

Informe final* del Proyecto JM058
Modelación de la distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental y su relación con la estructura del paisaje adyacente

Responsable:	Dr. Arturo Ruiz Luna
Institución:	Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental
Dirección:	Av. Sábalo Cerritos s/n Estero del Yugo, Mazatlán, Sin, 82010 , México
Correo electrónico:	arluna@ciad.mx
Teléfono/Fax:	Tel: 01 (669) 989 8700
Fecha de inicio:	Agosto 15, 2012.
Fecha de término:	Mayo 20, 2015.
Principales resultados:	Cartografía. fotografías, base de datos, informe final.
Forma de citar** el informe final y otros resultados:	Ruiz-Luna A., Berlanga-Robles, C.A., Hernández-Guzmán, R. y M.A. Escalante S. 2015. Modelación de la distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental y su relación con la estructura del paisaje adyacente. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. Unidad Mazatlán en Acuicultura y Manejo Ambiental. Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. JM058. Ciudad de México.

Resumen:

El proyecto se centra en el estudio de truchas nativas de México, que se distribuyen en la Sierra Madre Occidental. Se reconoce la existencia de la especie *Oncorhynchus chrysogaster* (Needham y Gard, 1964), denominada Trucha dorada mexicana (PISCES: Salmonidae), misma que está reportada como especie endémica amenazada en la NOM-059-SEMARNAT-2010 y como especie vulnerable en CITES (Conference on International Trade in Endangered Species). La situación de riesgo es aún más grave si se considera que estudios recientes indican que por la heterogeneidad genética de este complejo de peces, es posible la identificación de nuevas especies o subespecies de truchas nativas (Hendrickson et al., 2002, Hendrickson et al., 2006). Considerando lo anterior y tomando en cuenta que existen algunas iniciativas (particularmente realizadas por académicos estadounidenses y mexicanos), enfocadas al estudio sistemático y genético de este grupo de peces, se propone complementarlas con el análisis espacial del paisaje del área de distribución potencial de *O. chrysogaster*. Para ello se analizarán los registros históricos, los datos existentes con referencia geográfica específica y adicionalmente los datos que se generen a partir de este proyecto, para producir un modelo de distribución de esta especie en la Sierra Madre Occidental. Dado el escaso registro con que se cuenta se considera indispensable la colecta con fines de ampliar dicho registro, pero particularmente con la intención de validar en lo posible el modelo que se genere. Se aplicarán técnicas de percepción remota que permitirán identificar las características ambientales de las localidades de registro (red hidráulica, altitud, pendiente, tipos de cobertura) y que podrán ser incorporadas a un sistema de información geográfica (SIG), conjuntamente con información auxiliar (temperaturas promedio, precipitación, geología, etc.). La identificación de estas características, en conjunto con datos de la presencia/ausencia de las truchas permitirá generar mapas de susceptibilidad de las áreas de distribución de estas especies por medio de modelos del nicho ecológico, por ejemplo MAXENT y Mahalanobis.

-
- * El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en www.conabio.gob.mx
 - ** El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.

**UNIDAD MAZATLÁN EN ACUICULTURA Y MANEJO AMBIENTAL
CENTRO DE INVESTIGACION EN ALIMENTACION Y
DESARROLLO, A.C.**

**Modelación de la distribución de truchas nativas de la
Sierra Madre Occidental y su relación con la
estructura del paisaje adyacente**



**Dr. Arturo Ruiz Luna
Laboratorio de Manejo Ambiental
Responsable Técnico**

Mazatlán, Sinaloa, Octubre 2014

PARTICIPANTES

DR. ARTURO RUIZ LUNA

RESPONSABLE TÉCNICO

arluna@ciad.mx

DR. CÉSAR ALEJANDRO BERLANGA ROBLES

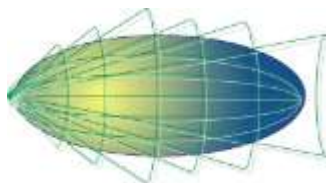
MODELACIÓN DE NICHOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

DR. RAFAEL HERNÁNDEZ GUZMÁN

DISEÑO Y DESARROLLO DE SIG

M. EN C. MARCO A. ESCALANTE SÁNCHEZ

BASES DE DATOS Y APOYO TÉCNICO



**Laboratorio de
Manejo Ambiental**

**LABORATORIO DE MANEJO AMBIENTAL
UNIDAD MAZATLÁN EN ACUICULTURA Y MANEJO AMBIENTAL
CIAD, A.C.**

**Av. Sábalo Cerritos s/n. Mazatlán, Sin. 82100.
Tel. +52 669 9898700 ext. 251. Fax. +52 669 9898700. A.P. 711**

CONTENIDO

Resumen ejecutivo	1
Introducción.....	2
Objetivos	7
Objetivo General	7
Objetivos particulares.....	7
Métodos	8
Método general	8
Criterios para la selección de la región de estudio.....	10
Clasificación de coberturas y usos de suelo	12
Descripción de variables utilizadas para la modelación y justificación biológica	18
Evaluación del modelo	20
Control de calidad de datos.....	20
Resultados	21
Caracterización paisajística del área de estudio	21
Imágenes MODIS.....	21
Imágenes Landsat.....	26
Imágenes SPOT.....	28
Registro de presencias de la especie	34
Modelación de área potencial de distribución	37
Modelación con Bioclim.....	42
Modelación con Maxent	52
Consideraciones finales	60
Agradecimientos.....	63
Referencias	64

FIGURAS

Fig. 1. Ubicación de los registros de especies de trucha nativas de México. Dentro del ovalo amarillo la localización donde se ha registrado la presencia de <i>O. chrysogaster</i> (Modificado de Mayden, 2005).....	3
Fig. 2. Modelo de distribución de truchas nativas mexicanas basado en la ubicación de localidades de registro de truchas en cuencas con drenaje al océano Pacífico con la aplicación del algoritmo GARP. (Fuente: Hendrickson et al., 2006).....	5
Fig. 3. Variación morfológica de Truchas Mexicanas. (a) Trucha dorada mexicana – <i>Oncorhynchus chrysogaster</i> ; (b) Trucha del San Lorenzo; (c) Trucha del Arroyo La Sidra; (d) Trucha del Mayo; (e) Trucha del Presidio; (f) Trucha del Bavispe/Cuenca Guzmán; (g) Trucha del Yaqui (Modificado de Hendrickson et al., 2002)	11
Fig. 4. Polígono delimitando el área de la Sierra Madre Occidental correspondiente a elevaciones de 1500 msnm o mayor.....	14
Fig. 5. Selección de imágenes Landsat TM5 utilizadas para la caracterización del paisaje de la Sierra Madre Occidental, durante la época de secas en el año de 2010. Se indican datos de captura (Path-Row, fecha y zona UTM) para cada imagen.....	17
Fig. 6. Clasificación de coberturas de terreno, a partir de imágenes del satélite MODIS, del área de distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental. Temporada de lluvias (31 octubre 2011) y sequía (08 marzo 2012). En verde, vegetación natural; amarillo, suelo expuesto/pastizal; naranja, agricultura. Las clases Cuerpos de agua y Poblados no se aprecian debido a la escala..	22
Fig. 7. Paisajes con combinación de vegetación natural y presencia de pastizales y suelos desnudos en la zona de estudio dentro de la Sierra Madre Occidental.	27
Fig. 8. Distribución de coberturas naturales e inducidas en la SMO, a partir de la clasificación de imágenes Landsat de 2010, en altitudes ≥ 1500 msnm, como área con potencial para la distribución de especies de trucha nativa <i>Oncorhynchus</i> sp.	28
Fig. 9. Vista parcial del área de estudio y cartografía generada con mosaico de imágenes multiespectrales de SPOT (2010) seleccionadas para la clasificación de coberturas de terreno en el área de distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental. Los polígonos rectangulares (a, b y c) corresponden a las áreas seleccionadas de manera arbitraria para determinar relación entre coberturas naturales y de origen antrópico.....	30
Fig. 10. Características de desarrollo en la región y algunas actividades económicas desarrolladas en la región, legales e ilegales, con efecto sobre la conservación de las truchas nativas y los ambientes de los que depende su supervivencia.	33
Fig. 11. Proceso de captura de truchas nativas con equipo de electropesca (Smith-Root 15-D POW).y registro de datos en la SMO.	35
Fig. 12. Registro de datos biológicos y morfométricos de <i>O. chrysogaster</i> en campo.....	36

Fig. 13. Despliegue en ArcGis del modelo digital de elevación, ajustado al área de distribución de truchas nativas de México en la Sierra Madre Occidental, definida por los límites de cuenca y altitud de 1500 msnm.....	38
Fig. 14. Distribución de valores de variables ambientales de Bioclim, partiendo de 28 registros validos de presencia de <i>O. chrysogaster</i> en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diurna; Bio14. Precipitación del mes más seco	44
Fig. 15. Frecuencia acumulada de valores de variables ambientales de Bioclim, partiendo de registros validos de presencia de <i>O. chrysogaster</i> en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diurna; Bio14. Precipitación del mes más seco	45
Fig. 16. Envolturas ambientales a partir de pares de variables ambientales, definidas por la ocurrencia de <i>O. chrysogaster</i> , de acuerdo a los valores observados en Bioclim. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diurna; Bio14. Precipitación del mes más seco.....	46
Fig. 17. Aproximación a la distribución potencial de <i>O. chrysogaster</i> en la SMO, modelada a partir de las variables climáticas de Bioclim. En escala cromática, la probabilidad de ocurrencia de la especie.	47
Fig. 18. Respuesta de variables ambientales a la presencia de <i>O. chrysogaster</i> en función de sitios de entrenamiento a partir de registros de presencia de la especie en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diurna; Bio14. Precipitación del mes más seco	48
Fig. 19. Curva de respuesta al análisis de Característica Operativa del Receptor o ROC. AUC. Área bajo la curva.	50
Fig. 20. Modelo de distribución potencial de <i>O. chrysogaster</i> producido con el algoritmo desarrollado en Bioclim y modelo binario (ausencia/presencia), generado a partir del umbral definido por la relación entre presencias verdaderas y falsas presencias.	52
Fig. 21. Aproximación a la distribución potencial de <i>O. chrysogaster</i> en la SMO, modelada con Maxent. En escala cromática, la probabilidad de ocurrencia de la especie.	53
Fig. 22. Aproximación a la distribución potencial de <i>O. chrysogaster</i> en la SMO, modelada con Maxent, salida logística. En escala cromática, la probabilidad de ocurrencia de la especie.....	54
Fig. 23. Contribución de las tres variables ambientales para la modelación de distribución potencial de trucha <i>O. chrysogaster</i> en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diurna; Bio14. Precipitación del mes más seco	55
Fig. 24. Contribución de las tres variables ambientales para la modelación de distribución potencial de trucha <i>O. chrysogaster</i> en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diurna; Bio14. Precipitación del mes más seco	56
Fig. 25. Curva de respuesta al análisis de Característica Operativa del Receptor o ROC, con base en el modelo Maxent. AUC. Área bajo la curva.	57
Fig. 26. Curva de respuesta al análisis de Característica Operativa del Receptor o ROC. AUC. Área bajo la curva.	58

Fig. 27. Modelo de distribución potencial de *O. chrysogaster* producido con Maxent (modelo logístico) y modelo binario (ausencia/presencia), generado a partir del umbral definido por la relación entre presencias verdaderas y falsas presencias. 59

TABLAS

Tabla 1. Variables ambientales incluidas en el modelo Bioclim, a partir de las cuales se generó el modelo de distribución potencial de <i>O. chrysogaster</i> . Se adicionó la variable Altitud (Bio0), derivada de un modelo de elevación digital (DEM) obtenido del portal de WorldClim.	19
Tabla 2. Extensión de coberturas de terreno en el área de distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental a partir de la clasificación digital de imágenes MODIS. Temporada de sequía (marzo 2012) y lluvias (octubre de 2011). Extensión (ha) y proporción (%). Cifras redondeadas a la decena más próxima.	21
Tabla 3. Matriz de confusión entre resultados de clasificación de dos imágenes del satélite MODIS (en número de píxeles) para dos periodos de 2010 (lluvias y secas). PSD. Pastizales/Suelos desnudos; VEG. Vegetación natural; AGR. Suelos agrícolas. CUA. Cuerpos de agua; POB. Poblados; PSC. Píxeles sin clasificar o nubes. EU. Exactitud del evaluador. EP. Exactitud del productor.	23
Tabla 4. Matriz de confusión entre resultados de clasificación de una imagen MODIS registrada en época de secas del año 2010 para la Sierra Madre Occidental (SMO), expresados como número de píxeles y el equivalente derivado del sistema de clasificación de coberturas terrestres NALCMS de la Comisión para la Cooperación Ambiental del Tratado de Libre Comercio para Norteamérica. PSD. Pastizales/Suelos desnudos; VEG. Vegetación natural; AGR. Suelos agrícolas. CUA. Cuerpos de agua; POB. Poblados; PSC. Píxeles sin clasificar o nubes. EU. Exactitud del evaluador. EP. Exactitud del productor.	24
Tabla 5. Matriz de confusión entre resultados de clasificación de una imagen MODIS registrada en época de secas del año 2010 para la Sierra Madre Occidental (SMO), expresados como número de píxeles y el equivalente derivado del sistema de clasificación de coberturas terrestres NALCMS de la Comisión para la Cooperación Ambiental del Tratado de Libre Comercio para Norteamérica. PSD. Pastizales/Suelos desnudos; VEG. Vegetación natural; AGR. Suelos agrícolas. CUA. Cuerpos de agua; POB. Poblados; PSC. Píxeles sin clasificar o nubes. EU. Exactitud del evaluador. EP. Exactitud del productor.	25
Tabla 6. Extensión (ha) y proporción (%) de las principales coberturas de terreno en el área de distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental a partir de la clasificación digital de imágenes Landsat. Se incluyen los valores de proporción (%) correspondientes a la clasificación de imágenes MODIS para su comparación. Cifras redondeadas a la decena más próxima.	26
Tabla 7. Extensión de las principales coberturas de terreno en áreas limitadas asociadas a la presencia confirmada de truchas nativas en el norte (a), centro (b) y sur (c) del área de estudio en la SMO, a partir de imágenes SPOT del 2010.	30
Tabla 8. Estadísticas básicas de la distribución de valores de las distintas variables ambientales de Bioclim acotadas a la región geográfica definida por las coordenadas extremas -112° a -102° W y	

20° a 32° N. Se incluyen los valores mínimos (min), máximo (max), promedio (media) y su respectiva desviación estándar (d.e.).	39
Tabla 9. Valores de calidad de agua obtenidos en la Sierra Madre Occidental, durante los meses de Febrero y Marzo de 2014. (n = 85 registros)	41
Tabla 10. Matriz de valores del coeficiente de correlación entre las distintas variables ambientales de Bioclim acotadas a la región geográfica definida por las coordenadas extremas -112° a -102° W y 20° a 32° N.	43
Tabla 11. Datos estadísticos de la distribución (cuartiles, Q) de las variables ambientales asociadas con la distribución geográfica de registros de <i>O. chrysogaster</i> . Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diurna; Bio14. Precipitación del mes más seco	44

RESUMEN EJECUTIVO

Con relación al complejo de especies de salmónidos nativos que se distribuyen en la Sierra Madre Occidental (SMO), el presente estudio se centró en el modelado de la distribución espacial de la trucha *O. chrysogaster* en la región. En la SMO concurren diversas cuencas hidrológicas tanto endo como exorreicas, que desembocan al océano Pacífico principalmente, pero también con tributarios de ríos que desembocan en el Golfo de México. Dentro de esta región se cuenta con registros históricos de presencia de la especie, que fueron actualizados dentro de lo posible con dos campañas de muestreo realizadas como parte del proyecto, obteniéndose solamente dos registros nuevos. Contando con la información ambiental contenida en las variables bioclimáticas de Worldclim, se modeló la presencia de la especie en la SMO, utilizando las aplicaciones de Bioclim y Maxent. Ambos modelos coinciden en ubicar los sitios con mayor aptitud en la cuenca del río Fuerte, sin embargo existen diferencias en cuanto a los límites de altitud, variación diurna de la temperatura y precipitación en el mes más seco, que fueron las tres variables que mejor explican la presencia de *O. chrysogaster*. En ambas aproximaciones metodológicas, se ubican altitudes superiores a los 2000 msnm como áreas óptimas para la distribución, en tanto que la mayoría de los estudios sobre el grupo de especies de trucha señala que su distribución inicia alrededor de los 1500 msnm. La validación de los modelos utilizando la misma información de entrada indica que el correspondiente a Maxent produjo mejores resultados, habiéndose categorizado como Excelente de acuerdo al sistema de clasificación aplicado. Finalmente cabe mencionarse que el análisis de paisaje realizado por medio de la clasificación de imágenes recientes de los satélites MODIS, Landsat y SPOT indica que existe un elevado nivel de naturalidad en la región, interpretado como la relación entre la extensión de coberturas naturales en comparación con las inducidas o culturales, lo que permite asumir que aún persisten condiciones adecuadas para la permanencia de esta especie en la región.

INTRODUCCIÓN

Las especies de trucha que residen de manera exclusiva en territorio mexicano, representan al grupo de salmónidos (PISCES: SALMONIDAE) cuya distribución alcanza el límite sur para el conjunto de especies de esta familia, lo cual les confiere un valor intrínseco para su conservación. Pertenecen al género *Oncorhynchus*, que actualmente se integra por 17 especies formalmente descritas. De éstas, solamente dos son reconocidas formalmente como truchas nativas de México (Miller, 2009); la subespecie *O. mikyss nelsoni* (Evermann, 1908), conocida como trucha arco-iris de Baja California (BC) o trucha de San Pedro Martir y la trucha dorada *O. chrysogaster* (Needham and Gard, 1964).

De las dos especies anteriores, la primera se distribuye en la sierra de San Pedro Mártir (BC) y la segunda, que es objeto del presente estudio, en la Sierra Madre Occidental (SMO) asociada principalmente con las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, si bien los límites de su distribución podrían variar en función del resultado de los estudios genéticos que se están realizando sobre este grupo de peces, particularmente por el grupo de Genética de la Conservación, del CIBNOR (<http://www.cibnor.mx/es/investigacion/planeacion-ambiental-y-conservacion/lineas-y-proyectos-de-investigacion/proyectos-linea-iv/425-proyecto-diversidad-genetica>). Considerando en principio tres de las cuencas antes señaladas, se ha reportado un total de 15 localidades confirmadas donde se ha registrado a *O. chrysogaster* (Fig. 1), la mayoría de los registros realizados en el río Fuerte (10) y el resto en el río Sinaloa (4), además de una localidad registrada en el río Culiacán (Mayden, 2005).

Se considera que la razón principal del reducido número de localidades con registro para estas especies se relaciona directamente con la dificultad para el acceso a su área de distribución, con escaso desarrollo de vías de comunicación, pero también al limitado interés por el estudio de la ictiofauna continental de México, lo que inclusive ha propiciado la extinción de algunas especies, particularmente en regiones donde el desarrollo regional produce presiones por el uso de agua y contaminación de ambientes acuáticos (Minckley and Miller, 2009).

Aun con las mencionadas limitaciones, gracias al trabajo de naturalistas de fines del siglo XIX y de la primera mitad del siglo XX, pero especialmente gracias a la integración de grupo binacional (México – EUA) Truchas Mexicanas (<http://truchasmexicanas.org/>), se cuenta con información básica sobre su distribución, taxonomía y biología (Hendrickson, 2002), siendo el presente estudio uno más que se suma a este esfuerzo.

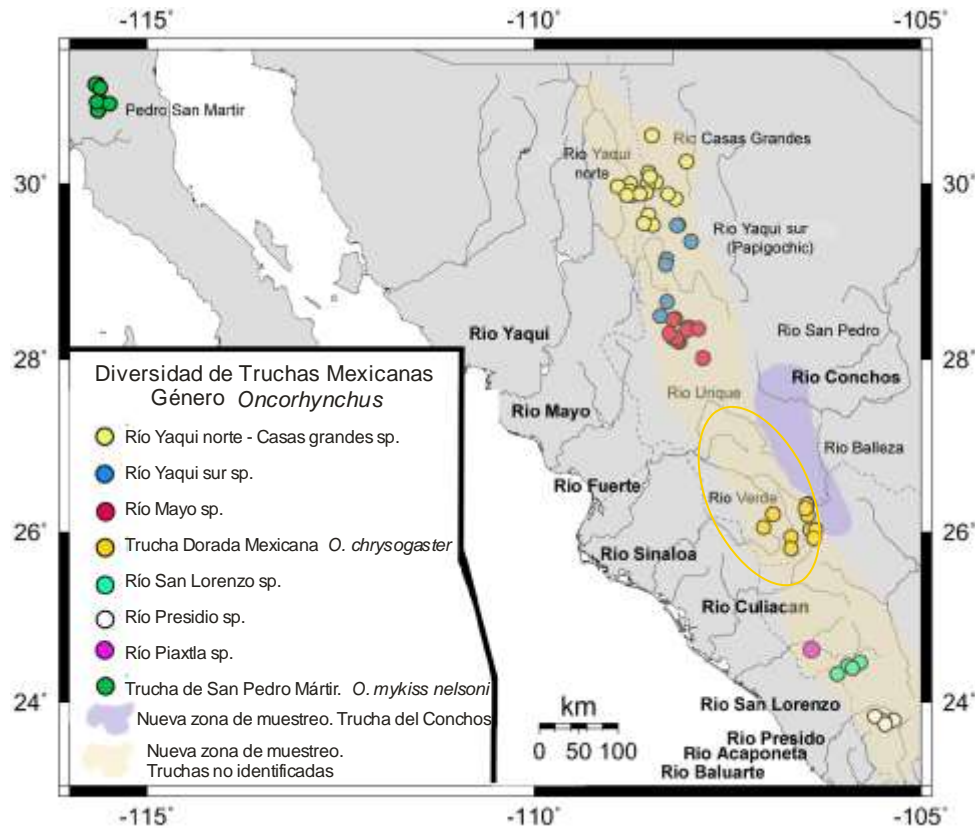


Fig. 1. Ubicación de los registros de especies de trucha nativas de México. Dentro del ovalo amarillo la localización donde se ha registrado la presencia de *O. chrysogaster* (Modificado de Mayden, 2005)

A partir de la experiencia desarrollada por los investigadores mencionados y considerando la totalidad de los registros para todas las especies del género, incluyendo colectas de especies no identificadas plenamente, se ha intentado modelar su área de distribución con el fin de identificar sitios donde potencialmente fuera factible la presencia de estas especies para incrementar el nivel de conocimiento sobre las mismas y en su caso favorecer su conservación y

manejo. Como resultado de esos intentos se cuenta actualmente con una propuesta de distribución generada con el modelo de nicho a partir de la aplicación del algoritmo GARP (*Genetic Algorithm for Rule-set Production*), un sistema de análisis integrado que incorpora la componente espacial para predecir el área de distribución de plantas y animales, basado en una serie de reglas aplicables a arboles de decisión y métodos multivariados (Stockwell and Noble, 1992; Stockwell and Peters, 1999) que determina regiones geográficas con condiciones similares a las observadas para los datos de entrada, en este caso de las localidades con registro de las especies del género.

El resultado obtenido por el grupo Truchas Mexicanas ha sido muy exitoso, dado que permitió identificar sitios con presencia de truchas en la cuenca del río Conchos, para la que no se incluyeron registros pues los datos de entrada correspondían solo a cuencas con drenaje hacia el Pacífico. El modelo generado (Fig. 2) permitió el reconocimiento de sitios donde se realizaron registros de un grupo de truchas no identificadas que probablemente constituyen una nueva especie, actualmente designada como “Trucha del Conchos” (http://www.utexas.edu/tmm/tnhc/fish/research/truchas_mexicanas/pub/conchos/Conchos_trout_white_paper_April_13_2006_general.pdf).

Actualmente no se cuenta con ningún modelo particular de distribución para alguna de las especies del género, sin embargo hay diversas iniciativas para acumular información sobre este grupo de peces, para el cual se considera existe un alto riesgo en términos de conservación, ya que hay evidencias de una importante modificación en los componentes naturales del paisaje y en la calidad de agua, derivados de actividades forestales, agrícolas y mineras, además del potencial riesgo de pérdida de diversidad debido a la introgresión genética provocada por la liberación accidental o intencionada de ejemplares de trucha introducida (trucha arco iris *O. mykiss*), con propósitos de cultivo.

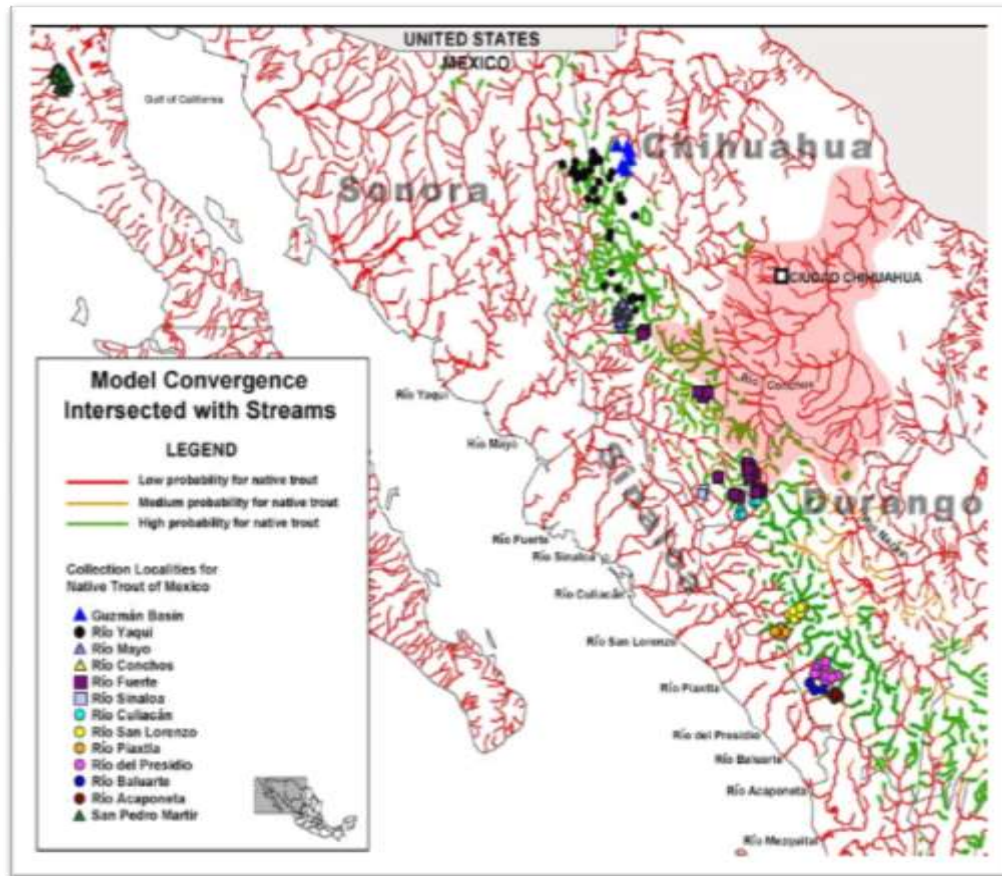


Fig. 2. Modelo de distribución de truchas nativas mexicanas basado en la ubicación de localidades de registro de truchas en cuencas con drenaje al océano Pacífico con la aplicación del algoritmo GARP. (Fuente: Hendrickson et al., 2006).

Como consecuencia, se ha despertado el interés por estudiar este grupo íctico, recibiendo la mayor atención y esfuerzos las especies formalmente descritas, con el objeto de ir generando información sobre aspectos de su biología, reproducción, genética y distribución, entre otros, siendo el presente un esfuerzo adicional por aportar nueva información sobre la ubicación de sitios con potencial para la distribución de *O. chrysogaster*.

Se asume que esta información proporcionará elementos de apoyo para la conservación de esta especie, pero también que los resultados darán pauta para la optimización de recursos y esfuerzos en futuras investigaciones que involucren disciplinas relacionadas con su conservación y posible manejo a través del desarrollo de biotecnologías que permitan mantener el acervo genético y generar

recursos adicionales para el desarrollo regional, haciendo innecesaria la introducción de especies exóticas.

Con esas consideraciones, el presente estudio propone un modelo de distribución de la especie *O. chrysogaster*, única del grupo de truchas de la SMO con reconocimiento formal para la ciencia, basado en la escasa información disponible, con la aportación de nuevos datos generados a partir de muestreos recientes apoyados con fondos del presente proyecto.

OBJETIVOS

Objetivo General

Generar modelos de distribución de la trucha *O. chrysogaster*, nativa de México, en la Sierra Madre Occidental con el fin de identificar su nicho potencial con base en el análisis de datos de presencia y variables ambientales.

Objetivos particulares

Los objetivos particulares que se propusieron para alcanzar el objetivo final son los siguientes:

- 1) Recopilar los registros históricos de la presencia de *O. chrysogaster* en la SMO e integrarlos en una base de datos.
- 2) Caracterización del paisaje y determinación de sitios de muestreo
- 3) Recopilar e integrar en un SIG las variables climáticas y topográficas con el fin de caracterizar el espacio ambiental habitable por *O. chrysogaster* en la SMO.
- 4) Modelar el nicho potencial de *O. chrysogaster* a través de la implementación de los modelos de nicho ecológico basados en datos de presencia de especies

MÉTODOS

Método general

La modelación del área potencial de distribución de *O. chrysogaster* se hizo con base en el concepto de nicho Grinnelleano o ambiental que define al nicho como el rango de valores de factores ambientales que son necesarios y suficientes para permitir a las especies completar su ciclo de vida (James et al., 1984). Adicionalmente, el planteamiento del modelo involucra la determinación del área potencial de distribución, que es la resultante de identificar las áreas geográficas donde se tiene registro de la especie o área ocupada (G_o) y el área invadible (G_i), de acuerdo a la aproximación teórica BAM (Biótico, Abiótico, Movimiento) desarrollada por Soberón y Peterson (2005), también descrita ampliamente en Peterson et al. (2011).

Para llevar a efecto esta modelación se utilizaron datos de presencia de la especie, a partir de lo cual es posible identificar las variables que definen las condiciones ambientales locales, para posteriormente extrapolarlas a una escala regional apoyados en información secundaria, procedente de distintas fuentes independientes del presente proyecto. Entre otras fuentes, las que mayor atención merecen son todas aquellas que han tenido un desarrollo significativo gracias a que integran y facilitan la distribución de datos ambientales (e.g. WorldClim - Global Climate Data, Geodata UNEP, WRI), datos de presencia de especies provenientes de diferentes colecciones científicas, reunidos en sitios como Global Biodiversity Information Facility (GBIF) y programas de cómputo integrados a los sistemas de Información Geográfica (SIG), con aplicaciones específicas en el tema de modelación de nicho.

Siguiendo la propuesta de un esquema heurístico como el promovido por Soberón y Peterson (2005), se plantea la identificación de las interacciones entre los factores que determinan la distribución actual de una especie y que, como ya se indicó, corresponden a zonas donde los factores biológicos (B), abióticos (A) y de movimiento (M) de la especie (que le permite desplazarse en tiempo histórico

para ocupar sitios con viabilidad para su permanencia) posibilitan su propagación, integrándose en un espacio geográfico amplio denominado G. La intersección entre los tres subconjuntos (BAM) determina la región donde es posible encontrar a la especie (G_0), mientras que la intersección entre B y A ($G_1 = BA$) solamente, define la distribución potencial de la especie o área invadible, cuando las barreras geográficas son removidas (Soberón y Nakamura, 2009).

En función de lo anterior y dadas las características de los datos disponibles, limitados a un reducido número de registros de presencia se optó por la identificación del área geográfica $G_0 \cup G_1$, utilizando los modelos de nicho ecológico Bioclim y Maxent. El primero es conocido como un método de “envoltura climática”, diseñado especialmente para aplicarse con las biovariables climáticas de WorldClim (<http://www.worldclim.org/>), aunque puede ejecutarse con cualquier otro conjunto de variables cuantitativas. Este método calcula los límites de las variables ambientales que definen la ocurrencia de las especies, generando un rectángulo por pares de variables ambientales, que representa la envoltura ambiental de la especie en cuestión (Busby, 1991). Con este método se realizó un primer intento de modelación, que finalmente fue considerado como parte de un análisis exploratorio y a partir de los resultados se procedió a definir de manera definitiva el espacio geográfico con el algoritmo de máxima entropía (Maxent).

Este último método no requiere de datos de ausencia, basándose exclusivamente en datos ambientales que cubran en su totalidad el área de estudio. En función de la información ambiental disponible, el algoritmo reconoce las propiedades de las localidades de referencia y las extrapola al resto del área de estudio. Maxent se basa en el principio de máxima entropía, que establece que, una vez que se conocen ciertas condiciones (en este caso las condiciones donde reside la especie), la distribución de equilibrio de un sistema es aquella que maximiza la cantidad de información o entropía, una magnitud física que describe la irreversibilidad del sistema, asignando probabilidades con un criterio de prejuicio mínimo, evitando suposiciones no soportadas por los datos (Phillips et al. 2006, Phillips and Dudik 2008).

Cabe mencionarse que originalmente el presente proyecto consideró otras posibilidades metodológicas como Mahalanobis o GARP, sin embargo se optó por las antes señaladas, ya que para localidades escasamente estudiadas o cuya información geográfica es limitada o imprecisa, Maxent produce mejores resultados que Mahalanobis (Hernández et al., 2008). De igual manera, se excluyó de la evaluación el modelo GARP, dado que tiene un mayor nivel de complejidad, que no se justifica en términos del incremento de su capacidad predictiva (Tsoar et al., 2007). Independientemente de estas apreciaciones y considerando las limitaciones del presente proyecto, los responsables del mismo continúan con el modelado de distribución de *O. chrysogaster*, manteniéndose vigente, por lo menos durante un periodo de dos años a partir de la publicación del presente, con el registro de datos de campo, lo que permitirá ir afinando los resultados con base en la modelización aplicando distintos algoritmos, incluyendo la aplicación futura de Mahalanobis y GARP, para actualizar la información y optimizar los resultados obtenidos en el presente estudio.

Aunque dichos resultados no forman parte del compromiso actual con CONABIO, cuando se encuentren disponibles se harán llegar a esta Comisión, para que de considerarlo adecuado, se adicionen a los resultados del presente informe.

Criterios para la selección de la región de estudio

Como se mencionó en el apartado de introducción, las truchas del Género *Oncorhynchus* nativas de México, residen con excepción de *O. mykiss nelsoni*, en ríos de la Sierra Madre Occidental, por arriba de los 1500 msnm, siendo éstas las primeras consideraciones para delimitar el área de estudio, es decir, el área geográfica correspondiente a la SMO (cuencas hidrográficas) con una superficie mayor de 750 000 km² y la cota de altitud de 1500 msnm, conjuntamente representan el área M donde hipotéticamente puede haberse dado o existe desplazamiento de estas especies a través de los cursos de arroyos y ríos en la región.

Por otro lado, el grupo binacional Truchas Mexicanas ha podido determinar la existencia de un complejo de especies del género *Oncorhynchus*, que si bien corresponden indudablemente al género, tienen particularidades morfológicas que hasta cierto punto permiten distinguirlos por cuenca hidrográfica gracias a su coloración y morfología (Fig. 3).

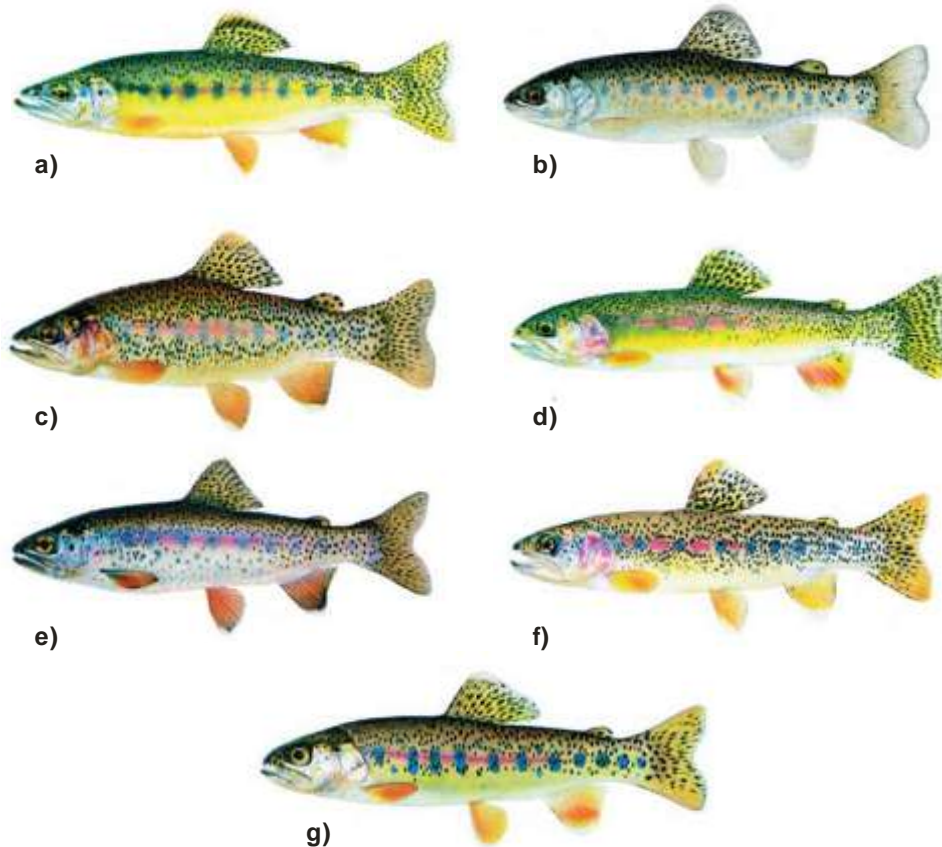


Fig. 3. Variación morfológica de Truchas Mexicanas. (a) Trucha dorada mexicana – *Oncorhynchus chrysogaster*; (b) Trucha del San Lorenzo; (c) Trucha del Arroyo La Sidra; (d) Trucha del Mayo; (e) Trucha del Presidio; (f) Trucha del Bavispe/Cuenca Guzmán; (g) Trucha del Yaqui (Modificado de Hendrickson et al., 2002)

Si bien no existen referencias bibliográficas que confirmen la existencia de distintas especies ni certeza sobre el posible número, las barreras geográficas determinadas por las distintas cuencas hidrográficas donde habitan y las diferencias morfológicas permiten hipotetizar su existencia. Esta hipótesis está siendo comprobada por medio de distintos análisis genéticos y aunque aún no se

cuenta con resultados definitivos, se presume que existen al menos 13 especies de acuerdo con resultados preliminares obtenidos en el Laboratorio de Genética de la Conservación del CIBNOR, (Com. Pers. F. García de León), así como las posibilidades de riesgo de introgresión genética y pérdida de diversidad genética (Escalante et al. 2014).

De confirmarse la existencia de dichas especies, esto implicaría que en la SMO se ubica cerca del 20% de las truchas del planeta (Hendrickson et al. 2006), lo que indica en buena medida la importancia de la región para propósitos de conservación de éstas y otras especies nativas. Adicionalmente, los resultados de análisis genéticos y moleculares de los ejemplares capturados indican que las truchas nativas cuentan con un pool genético totalmente distinto de las truchas de Estados Unidos (Nielsen 1997; Nielsen et al., 1998; Nielsen et al., 1999; Nielsen and Sage, 2001).

Clasificación de coberturas y usos de suelo

En la integración final del SIG final se incorporó información sobre el estado *reciente* de la cobertura vegetal, cuerpos de agua y de otras coberturas y usos de suelo, a partir de la clasificación de imágenes del satélite MODIS Terra-1 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Landsat y SPOT. Con relación a MODIS Terra-1, este satélite cuenta con 36 canales espectrales, los siete primeros, con mayor resolución espacial (250 a 500 m), están orientados al estudio de coberturas terrestres y usos de suelo, nubes y aerosoles, mientras que los 29 restantes tienen mayores aplicaciones en estudios del océano y atmosféricos.

Las imágenes utilizadas fueron obtenidas del portal de la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (http://www.conabio.gob.mx/informacion/geo_espanol/modis/modis_ftp.html), para el periodo de lluvias (31 de Octubre 2011) y de secas (08 de Marzo de 2012). Ambas imágenes se encuentran calibradas y rectificadas de origen, con proyección Cónica Conforme de Lambert, Datum NAD27 y esferoide Clarke 1866.

Para realizar el análisis del área de estudio se utilizaron las bandas 1 a 7 que incluyen dos bandas con resolución espacial de 250 m (Visible rojo 0.620 – 0.670 μ e Infrarrojo cercano 0.841 – 0.876 μ) y cinco bandas con resolución espacial de 500 m (banda 3 (visible azul 0.459 – 0.479 μ), 4 (visible verde 0.545 – 0.565 μ), 5 (Infrarrojo cercano 1.23 – 1.25 μ), 6 (Infrarrojo cercano 1.628 – 1.652 μ) y 7 (Infrarrojo cercano 2.105 – 2.155 μ).

La totalidad de las bandas espectrales de las dos imágenes antes mencionadas fueron procesadas con el software Idrisi Taiga (Eastman, 2009), donde en principio se procedió a ajustar la resolución de las bandas de 500 m a 250 m mediante el comando Expand. La función de este comando es dividir los pixeles de las bandas introducidas, para ajustar al tamaño de pixel deseado, en este caso 250 m.

El área seleccionada para la clasificación fue definida por medio del polígono generado con el límite de los 1500 m de altitud en la Sierra Madre Occidental (Fig. 4), mismo que se obtuvo a partir del procesamiento de los modelos de elevación digital del CEM 3.0 de INEGI.

Posteriormente y para un área ligeramente superior a la contenida por el polígono anterior, se procedió a la clasificación de estas imágenes, asociando pixeles con afinidad espectral a una cobertura de terreno en específico, utilizando un procedimiento no supervisado con el algoritmo K-Means, estableciendo previamente las categorías que integran el paisaje para su posterior identificación. En este caso se eligieron cinco clases representativas del paisaje (Agricultura, Cuerpos de agua, Poblados, Suelo expuesto/Pastizales y Vegetación natural), considerando la resolución espacial y los objetivos del proyecto. Este algoritmo usa una técnica de agregación que asigna cada pixel al centroide más cercano. Dadas las características de la técnica, se sugiere iniciar el proceso con un número de clusters o agregados al menos 5 veces superior al número de clases a obtener (Richards and Jia, 2006).

Con estos resultados se reclasificaron los pixeles que presentaron afinidad y que claramente correspondían a alguna de las clases mencionadas. Adicionalmente, cuando fue necesario, se incluyeron las clases nubes y pixeles sin

clasificar, conteniendo en esta última a todos aquellos para los que no fue posible la asignación en alguna de las clases mencionadas. En el caso particular de la cobertura denominada Poblados, que incluye zona rural y urbana, el resultado final fue actualizado con la superposición de vectores extraídos de la serie III de INEGI, luego de su rasterización. Finalmente se ajustó el área a la delimitada por la cota de altitud de los 1500 msnm, procedimiento que se realizó con el programa ArcGis.



Fig. 4. Polígono delimitando el área de la Sierra Madre Occidental correspondiente a elevaciones de 1500 msnm o mayor.

El resultado de la clasificación digital de imágenes permitió una caracterización general del paisaje para dos etapas características del año (secas/lluvias), si bien con límites temporales no definidos claramente. La época de secas se prolonga normalmente de Noviembre a Mayo, mientras que la de lluvias se extiende de Junio a Octubre.

Los resultados obtenidos a partir de las clasificaciones de MODIS en ambas temporadas fueron contrastados entre sí y de igual manera con los resultados de la clasificación producida para el año 2010 dentro del programa *North American Land Change Monitoring System* (NALCMS) que se realiza de manera conjunta entre el Resources Canada/Canada Center for Remote Sensing (NRCan/CCRS); la agencia norteamericana United States Geological Survey (USGS) y tres agencias Mexicanas integradas por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI); la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y que puede ser descargada de la página de la Comisión de Cooperación Ambiental (CCA) <http://www.cec.org/Page.asp?PageID=122&ContentID=2819>, generada a partir de la integración del tratado de Libre Comercio.

Para llevar a cabo este análisis se generaron matrices de confusión que permitieron detectar diferencias entre épocas del año y entre estas y la clasificación del NALCMS. Se obtuvieron valores de los indicadores de exactitud general (%), exactitud del productor y del usuario y el estimador K^{\wedge} (Khappa) de concordancia (Congalton y Green, 2009), como medidas de similitud o diferencia entre las distintas clasificaciones.

En el caso de las imágenes Landsat, se consideró un periodo único debido al número de imágenes requeridas para la clasificación del paisaje completo de la SMO (32), lo que resulta en una limitante para la capacidad de procesamiento del equipo disponible en el Lab. de Manejo Ambiental, una vez que la clasificación de las imágenes se completa y es necesaria su incorporación al SIG. Por lo anterior se procedió a la clasificación y su posterior recorte al área definida para el estudio, que considera únicamente altitudes superiores a 1500 msnm, quedando reducido

a 16 (dieciséis) el número de imágenes que se incorporaron en el análisis definitivo (Fig. 5) y de cual se presentan resultados en la sección correspondiente.

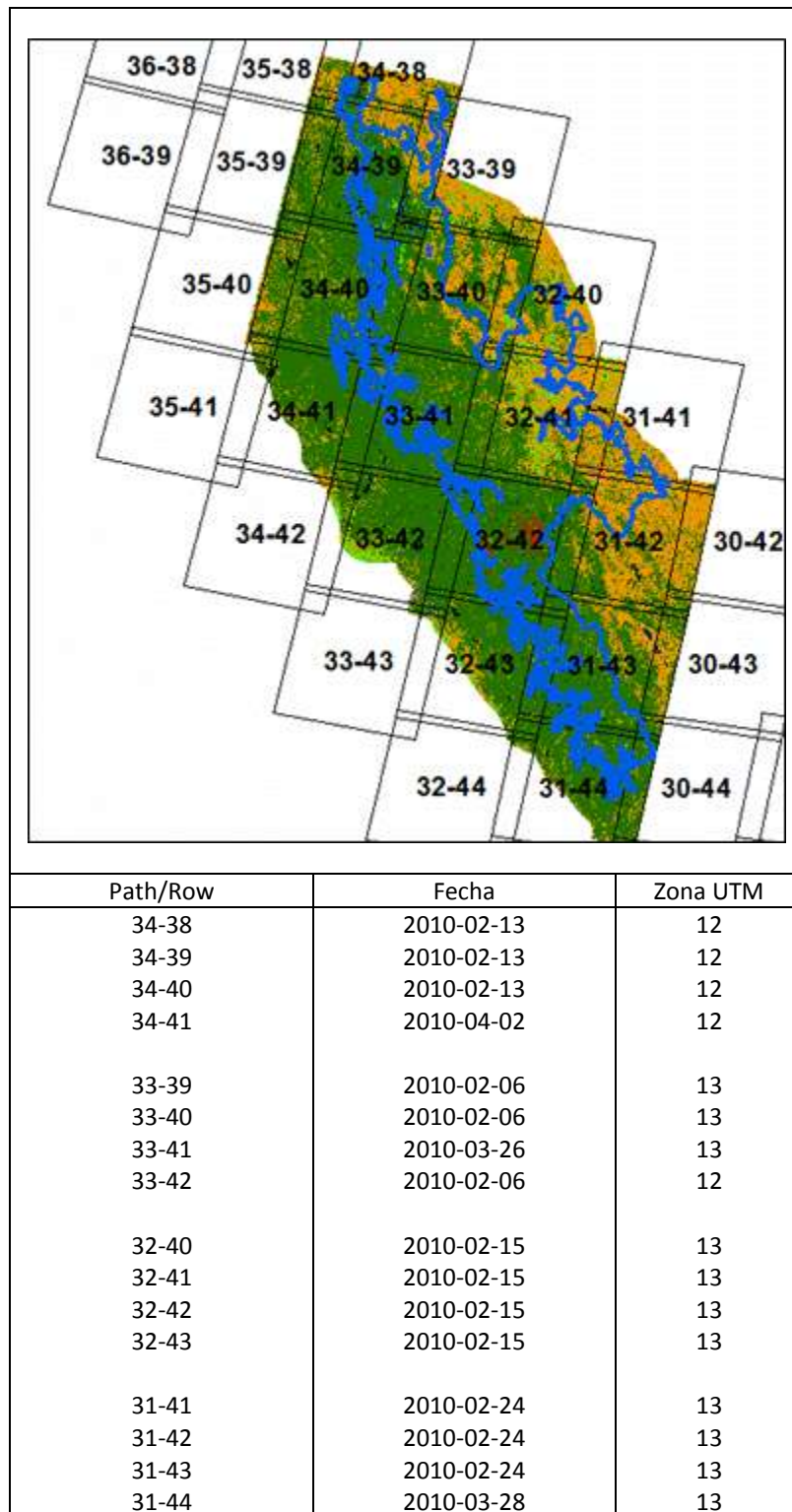


Fig. 5. Selección de imágenes Landsat TM5 utilizadas para la caracterización del paisaje de la Sierra Madre Occidental, durante la época de secas en el año de 2010. Se indican datos de captura (Path-Row, fecha y zona UTM) para cada imagen.

Todas las imágenes corresponden al satélite Landsat TM5, registradas en su mayoría durante el mes de febrero de 2010 (13) y solo 3 fueron registradas durante los meses de marzo (2) y abril (1), lo que corresponde en conjunto al periodo de secas. Las imágenes fueron seleccionadas y descargadas del portal <http://glovis.usgs.gov/>, procediendo a su posterior clasificación, proceso que se realizó de forma independiente para cada una de las escenas, siguiendo un proceso similar al realizado con imágenes MODIS, utilizando K-means como algoritmo de agregación y reclasificando los datos resultantes en las clases informacionales ya señaladas.

Las imágenes cuentan con resolución espacial de 30 m y para la clasificación fueron utilizadas todas las bandas del espectro visible (3 bandas con resolución de 0.45 a 0.69 μ) y las del infrarrojo cercano y medio (3 bandas con resolución de 0.76 a 2.35 μ), exceptuando la banda 6 correspondiente al infrarrojo térmico. Una vez concluida la clasificación independiente de las imágenes se generó el mosaico que corresponde a la SMO, recortándose finalmente para ajustarse al área de estudio.

La fase de caracterización del paisaje concluyó con la clasificación de imágenes del satélite SPOT 5, con resolución espacial de 10 m y cuatro bandas espectrales que van de 0.5 a 1.75 μ , incluyendo dos bandas del espectro visible verde y rojo), una del infrarrojo cercano (0.78 – 0.89 μ) y otra del IR medio (1.58 – 1.75 μ), ésta última adquirida originalmente con 20 m de resolución. Las imágenes corresponden también al periodo de secas en el año 2010 y fueron obtenidas del Programa ERMEXS NG de la Marina Armada de México. En este caso, se utilizaron imágenes exclusivamente para las localidades donde se obtuvieron registros positivos de la especie durante la realización del presente proyecto.

Descripción de variables utilizadas para la modelación y justificación biológica

Asociadas con la Sierra Madre Occidental (SMO), se ubican 50 cuencas y subcuencas, la mitad de ellas correspondientes a ríos, mientras que el resto corresponde a arroyos, esteros, lagos y lagunas. De las anteriores, la mayoría se caracteriza como cuencas exorreicas (39) y el resto son endorreicas, pertenecientes a nueve regiones hidrológicas. Para el espacio geográfico seleccionado en el presente estudio, limitado por la cota de 1500 msnm, se estimó una superficie aproximada de 120 000 km², donde predomina claramente la vegetación natural conformada por cinco tipos de bosque (Bosque de Ayarín o pinabete, Bosque de Encino, Bosque de Encino-Pino, Bosque de Oyamel, Bosque de Pino, Bosque de Pino-Encino, Selva Baja Caducifolia), de acuerdo con la información provista en las cartas de Uso del suelo y vegetación desarrolladas por INEGI (Serie III).

Para propósitos de la modelación del nicho o del área potencial de distribución de la especie objetivo, se obtuvieron las 19 variables bioclimáticas del portal *WorldClim. Global Climate Data* (<http://www.worldclim.org/bioclim>), que incluyen la información (en formato raster o de rejilla), sobre precipitación y temperaturas, generadas por interpolación del promedio mensual de datos, con resolución de 30 arco-segundos o aproximadamente 1 km (1 km² por pixel). Los datos en formato .bil (band interval by line) de los mosaicos 12 y 22 de dicha base de datos, que engloban a la mayor parte del territorio mexicano, representan las tendencias seguidas por las variables bioclimáticas en periodos anuales, estacionales o por trimestre para situaciones extremas. Adicionalmente del mismo portal, se obtuvo un modelo digital de elevación (DEM), con los mismos parámetros espaciales que los raster de las 19 biovariables, etiquetándose como BIO0 para propósitos del presente estudio. La información fue acotada a los límites geográficos del área de estudio (G), dentro del polígono con coordenadas extremas: -112° a -102° longitud oeste y 20° a 32° latitud norte. Las variables incluidas en Bioclim se mencionan en la Tabla 1.

Pese a que los MDE descargados del portal de Bioclim (con resolución aproximada de 1 km) fueron usados en el proceso de modelación, a fin de contar con equivalencia en términos de resolución espacial, se produjeron dos mosaicos a partir de los modelos digitales de elevación derivados de imágenes Aster (ASTER GDEM) y del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0), ambos con resolución de 30 m. Ambas bases de datos fueron empleadas con el propósito de generar los límites de cuenca, la red de drenaje y orden de cauce, con los que se producirían los mapas finales (shapes) a integrarse en el SIG, con resolución de 30 m. Sin embargo, se utilizó finalmente el CEM 3.0 dada su disponibilidad con diferentes niveles de resolución espacial (15, 30, 60, 90 y 120 m), la integralidad y la continuidad de los datos digitales, que a diferencia de los datos procedentes de Aster, permiten diversos procedimientos sin que se requieran procesamientos previos.

Tabla 1. Variables ambientales incluidas en el modelo Bioclim, a partir de las cuales se generó el modelo de distribución potencial de *O. chrysogaster*. Se adicionó la variable Altitud (Bio0), derivada de un modelo de elevación digital (DEM) obtenido del portal de WorldClim.

Clave	Descripción
BIO0	Altitud (msnm). Con resolución aproximada de 1 km
BIO1	Temperatura media anual
BIO2	Rango de temperatura media diurna (media mensual (Tmax - Tmin))
BIO3	Isotermalidad (BIO2/BIO7*100)
BIO4	Estacionalidad de la temperatura (desviación estándar * 100)
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío
BIO7	Amplitud térmica anual (BIO5-BIO6)
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío
BIO12	Precipitación anual
BIO13	Precipitación del mes más húmedo
BIO14	Precipitación del mes más seco
BIO15	Estacionalidad de la precipitación (Coeficiente de variación; CV (%))
BIO16	Precipitación media del trimestre más húmedo
BIO17	Precipitación media del trimestre más seco
BIO18	Precipitación media del trimestre más cálido

Evaluación del modelo

Control de calidad de datos

Con relación a las truchas nativas mexicanas, actualmente existen cerca de 290 registros correspondientes a distintas campañas de colecta realizadas en la región de la SMO y de la sierra de San Pedro Mártir, BC. Aunque todos los registros corresponden a especímenes del género *Oncorhynchus*, en algunos casos la identificación no ha podido llevarse a nivel de especie.

De los registros anteriores, la mayoría corresponde a especies identificadas como *O. mykiss nelsonni* (trucha arcoíris de México o trucha de San Pedro Mártir), *O. mykiss*, *Salmo gairdneri* y *S. irideus*, siendo los dos últimos sinonimias de la trucha arco iris, especie que es utilizada para propósitos de cultivo y que tiene carácter de especie exótica para la región. Finalmente cerca del 15% del total de registros corresponde a la especie objeto del presente estudio, identificándose como *O. chrysogaster* o *S. chrysogaster*, ambas sinonimias.

Una vez seleccionados los registros que corresponden a esta última especie, se recopilaron todos aquellos que contaron con la información documental necesaria para ser incluida en el formato de registro Darwin.Core para la especie. Particularmente se incluyeron todos los registros que contaron con datos de localización geográfica, además de contar de material de referencia en alguna colección ictiológica, siguiendo en general los procedimientos marcados por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 2012).

RESULTADOS

Se presentan en primera instancia los resultados de la caracterización del paisaje, a partir de imágenes de distintos sensores y plataformas satelitales, a fin de contar con esta caracterización como marco de referencia ambiental.

Caracterización paisajística del área de estudio

Imágenes MODIS

Para ambas temporadas (secas/lluvia) consideradas, la vegetación natural, que de acuerdo con observaciones realizadas durante el trabajo de campo está representada principalmente por bosques de pino – encino, resultó la cobertura dominante en el paisaje con representación superior al 70%, con la clase pastizal/suelo expuesto como la segunda cobertura con mayor extensión, conjuntando más del 95% entre ambas y con las clases poblados y cuerpos de agua, como las menos representativas del paisaje (Tabla 2)

Tabla 2. Extensión de coberturas de terreno en el área de distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental a partir de la clasificación digital de imágenes MODIS. Temporada de sequía (marzo 2012) y lluvias (octubre de 2011). Extensión (ha) y proporción (%). Cifras redondeadas a la decena más próxima.

Coberturas	Secas		Lluvias	
	Extensión (ha)	%	Extensión (ha)	%
<i>Naturales</i>				
Vegetación natural	8,264,510	70.3	8,682,380	73.9
Pastizal/Suelo expuesto	2,961,820	25.2	2,530,000	21.5
Cuerpos de agua	5,880	<0.1	13,010	0.1
<i>Subtotal</i>	11,232,210	95.5	11,225,390	95.5
<i>Inducidas</i>				
Agricultura	506,230	4.3	512,880	4.4
Poblados	15,800	0.1	15,800	0.1
Píxeles sin clasificar (Nubes)			980	<0.01
<i>Subtotal</i>	522,030	4.4	529,660	4.5
<i>TOTAL</i>	11,754,240	100	11,755,050	100

En términos generales se observó que existe poca variación en cuanto a la superficie ocupada y en la distribución de las coberturas evaluadas (Fig. 6), obteniéndose elevados valores de los índices de concordancia estimados al compararse los resultados de las dos fechas analizadas con imágenes de MODIS, así como al contrastarse éstas con el producto de referencia del programa NALCMS, generado con base en la información del INEGI, la CONABIO y CONAFOR.

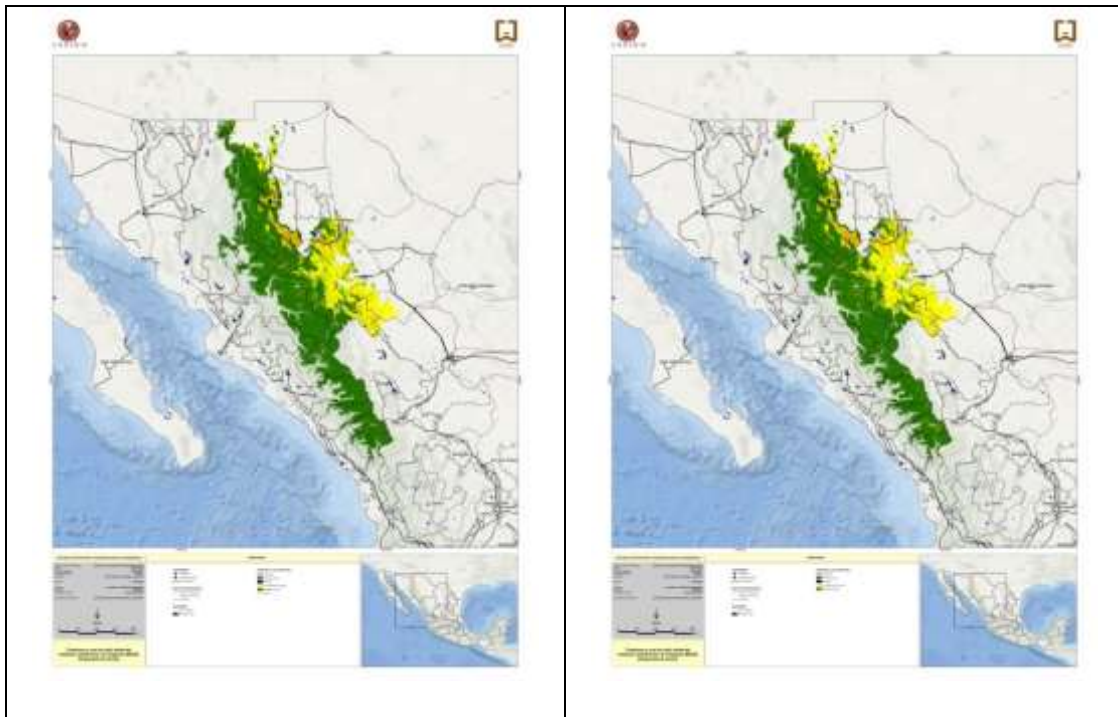


Fig. 6. Clasificación de coberturas de terreno, a partir de imágenes del satélite MODIS, del área de distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental. Temporada de lluvias (31 octubre 2011) y sequía (08 marzo 2012). En verde, vegetación natural; amarillo, suelo expuesto/pastizal; naranja, agricultura. Las clases Cuerpos de agua y Poblados no se aprecian debido a la escala.

Considerando los indicadores evaluados para determinar la validez de las clasificaciones, en primer término se obtuvieron valores de exactitud general, estimada como la proporción de coincidencias entre los dos mapas a comparar, entre el número total de píxeles o celdas que componen dichos mapas, expresada

como porcentaje. Se considera que existe una similitud elevada cuando dicha proporción es igual o superior al 80% y se acerca al 100%, valor que indica que las imágenes a comparar son idénticas.

Cuando se compararon entre si los resultados de la clasificación de productos MODIS para dos periodos intranuales distintos, analizando la diferencia entre el número y posición de los pixeles que representan las diferentes coberturas se obtuvo un valor superior al 90%, mostrando las principales diferencias asociadas con el espejo de agua de ambas fechas y la posibilidad de confusión entre la clase Pastizal/suelos expuestos con la clase Agricultura, principalmente (Tabla 3).

Tabla 3. Matriz de confusión entre resultados de clasificación de dos imágenes del satélite MODIS (en número de pixeles) para dos periodos de 2010 (lluvias y secas). PSD. Pastizales/Suelos desnudos; VEG. Vegetación natural; AGR. Suelos agrícolas. CUA. Cuerpos de agua; POB. Poblados; PSC. Pixeles sin clasificar o nubes. EU. Exactitud del evaluador. EP. Exactitud del productor.

		SECAS							
		PSD	VEG	AGR	CUA	POB	PSC	Sum ni+	EU
LLUVIAS	PSD	421257	102582	13850	878	0	182	538749	78.19
	VEG	26786	1462581	6284	660	0	0	1496311	97.75
	AGR	11932	7036	73089	73	0	0	92130	79.33
	CUA	154	150	25	763	0	0	1092	69.87
	POB	0	0	0	0	2873	0	2873	100.00
	PSC	0	0	0	0	0	0	0	
	Sum n+j	460129	1572349	93248	2374	2873	182	2131155	
	EP	91.55	93.02	78.38	32.14	100.00	0.00		

El otro indicador, conocido como κ , evaluado con base en la anterior matriz de confusión para determinar las posibles diferencias o nivel de concordancia, generó un valor de 0.81, lo que se clasifica como un nivel de concordancia Muy bueno/Casi perfecto, de acuerdo con la propuesta de Landis y Koch (1977). Esto implica que el arreglo observado, es decir una elevada similitud en la superficie y distribución de las coberturas analizadas, difícilmente es resultado del azar.

El mismo análisis se aplicó con las clasificaciones anteriores, contando con información de coberturas terrestres generada por el programa NALCMS para el año 2010, como referencia.

Se contrastaron los datos de cobertura ofrecidos por este producto, con los resultados obtenidos para las dos temporadas antes mencionadas (Tablas 4 y 5). El resultado obtenido, como era de esperarse por la similitud entre los productos generados a partir de MODIS, fue muy similar en ambos casos, con valores del índice de Exactitud Global de 85% y de $\kappa = 0.62$, observándose diferencias mínimas entre ambas temporadas.

Aun cuando el valor de κ obtenido de ambos análisis es relativamente bajo, se incluye dentro de la categoría de concordancia Buena/Sustancial, lo que implica que las diferencias, o en este caso las coincidencias, no pueden ser atribuibles al azar (Landis y Koch, 1977).

Tabla 4. Matriz de confusión entre resultados de clasificación de una imagen MODIS registrada en época de secas del año 2010 para la Sierra Madre Occidental (SMO), expresados como número de píxeles y el equivalente derivado del sistema de clasificación de coberturas terrestres NALCMS de la Comisión para la Cooperación Ambiental del Tratado de Libre Comercio para Norteamérica. PSD. Pastizales/Suelos desnudos; VEG. Vegetación natural; AGR. Suelos agrícolas. CUA. Cuerpos de agua; POB. Poblados; PSC. Píxeles sin clasificar o nubes. EU. Exactitud del evaluador. EP. Exactitud del productor.

		SECAS						
		PSD	VEG	AGR	CUA	POB	Sum ni+	EU
NALCMS	PSD	355895	52160	72527	309	1394	482285	73.79
	VEG	178118	1437711	13113	87	397	1629426	88.23
	AGR	2329	5730	6458	37	74	14628	44.15
	CUA	2018	675	59	659	0	3411	19.32
	POB	389	35	31	0	1008	1463	68.90
	Sum n+j	538749	1496311	92188	1092	2873	2131213	
	EP	66.06	96.08	7.01	60.35	35.09		

Considerando solamente la comparación entre el periodo de secas y el producto derivado del NALCMS, es importante destacar que la cobertura donde se encontraron menos diferencias al ser comparados ambos productos fue la correspondiente a la vegetación natural, mientras que la que representa a la

cobertura agrícola mostró el mayor error del productor, contando con un nivel de concordancia menor del 10% entre ambos productos comparados. En este caso, la confusión principal se da entre suelos agrícolas y la categoría denominada pastizales/suelos desnudos, que dependiendo de la época pueden tener firmas espectrales semejantes y generar confusión.

También en el caso de la clase Poblados se observaron importantes errores, tanto para el productor como para el usuario, sin que sea posible identificarse la fuente de error, pues se desconoce si el programa NACMS obtuvo la superficie estimada a través de clasificación de las imágenes, o como en el caso del presente estudio, con la superposición de vectores de las distintas poblaciones ubicadas dentro de la zona de estudio, procedentes de la serie III de INEGI, previamente rasterizadas, para evitar errores de confusión con otras clases.

Por lo que corresponde a la comparación con la época de lluvias, los resultados obtenidos en lo general arrojan valores de exactitud global de 85% y de $K^{\wedge}= 0.62$, similares a los obtenidos en el análisis anterior. De igual manera, los valores de error para productor y usuario fueron similares a los encontrados con la comparación de la época de secas, sin embargo se redujo el error asociado con la clasificación de cuerpos de agua al incrementarse la superficie de esta cobertura en la época de lluvias (Tabla 5).

Tabla 5. Matriz de confusión entre resultados de clasificación de una imagen MODIS registrada en época de secas del año 2010 para la Sierra Madre Occidental (SMO), expresados como número de píxeles y el equivalente derivado del sistema de clasificación de coberturas terrestres NALCMS de la Comisión para la Cooperación Ambiental del Tratado de Libre Comercio para Norteamérica. PSD. Pastizales/Suelos desnudos; VEG. Vegetación natural; AGR. Suelos agrícolas. CUA. Cuerpos de agua; POB. Poblados; PSC. Píxeles sin clasificar o nubes. EU. Exactitud del evaluador. EP. Exactitud del productor.

		LLUVIAS							
		PSD	VEG	AGR	CUA	POB	PSC	Sum ni+	EU
LLUVIAS	PSD	323401	84565	72269	609	1394	0	482238	67.1
	VEG	133449	1481260	13995	144	397	176	1629421	90.9
	AGR	1484	6068	6901	89	74	6	14622	47.2
	CUA	1423	399	57	1532	0	0	3411	44.9
	POB	372	57	26	0	1008	0	1463	68.9
	PSC	0	0	0	0	0	0	0	
	Sum n+j	460129	1572349	93248	2374	2873	182	2131155	

EP	70.28	94.21	7.40	64.53	35.09	0.00
----	-------	-------	------	-------	-------	------

Imágenes Landsat

El resultado final de la clasificación de imágenes Landsat correspondientes al periodo de secas en el año 2010, presenta resultados muy similares a los ya presentados y que fueron obtenidos a partir de imágenes MODIS, con la salvedad de que se incorporan dos clases no consideradas anteriormente, representadas por las sombras y cobertura de nieve. Ambos casos fueron incluidos dentro de la clase *pixeles sin identificar*, si bien es probable que correspondan a las dos principales coberturas identificadas en el área que son Vegetación natural y Pastizal/suelos desnudos. El resultado final no se altera en su conjunto y se revela una gran similitud en cuanto a los resultados obtenidos con la clasificación de ambos productos (Tabla 6)

Tabla 6. Extensión (ha) y proporción (%) de las principales coberturas de terreno en el área de distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental a partir de la clasificación digital de imágenes Landsat. Se incluyen los valores de proporción (%) correspondientes a la clasificación de imágenes MODIS para su comparación. Cifras redondeadas a la decena más próxima.

Coberturas	Landsat 2010		MODIS	
	Extensión (ha)	%	Secas (%)	Lluvia (%)
<i>Naturales</i>				
Vegetación natural	8,467,000	72.0	70.3	73.9
Pastizal/Suelo expuesto	2,386,570	20.3	25.2	21.5
Cuerpos de agua	15,310	<0.1	<0.1	0.1
<i>Subtotal</i>	1,0868,880	92.5	95.5	95.5
<i>Inducidas</i>				
Agricultura	579,300	4.9	4.3	4.4
Poblados	18,170	0.2	0.1	0.1
<i>Subtotal</i>	885,370	5.1		<0.01
Pixeles sin clasificar (Nieve, sombras)	287,900	2.5	4.4	4.5
<i>TOTAL</i>	11,754,250	100.0	100.0	100.0

El patrón de distribución de las coberturas también muestra semejanzas con lo observado a partir de las imágenes MODIS, sin embargo, considerando el aumento en la resolución tanto espacial como espectral, se identifica un patrón menos homogéneo de la cobertura vegetal, que muestra mayor infiltración por parte de la cobertura correspondiente a Pastizal/Suelos desnudos, un patrón que definitivamente se corresponde con lo observado durante la realización del trabajo de campo (Fig. 7).



Fig. 7. Paisajes con combinación de vegetación natural y presencia de pastizales y suelos desnudos en la zona de estudio dentro de la Sierra Madre Occidental.

Dada la similitud en los resultados obtenidos y por carecerse de suficientes registros en campo para cubrir la totalidad del área de estudio, la validación de los resultados no se llevó a cabo como en el caso anterior, asumiéndose que aunque hay diferencias en cuanto a la resolución espacial y espectral, el procedimiento aplicado para la clasificación de las imágenes Landsat es análogo al empleado con las imágenes MODIS, por lo que se asume también que el nivel de error de la

presente clasificación es similar a los obtenidos previamente. Con base en lo anterior se presenta en la figura 8, la cartografía resultante del proceso de clasificación de las imágenes Landsat.

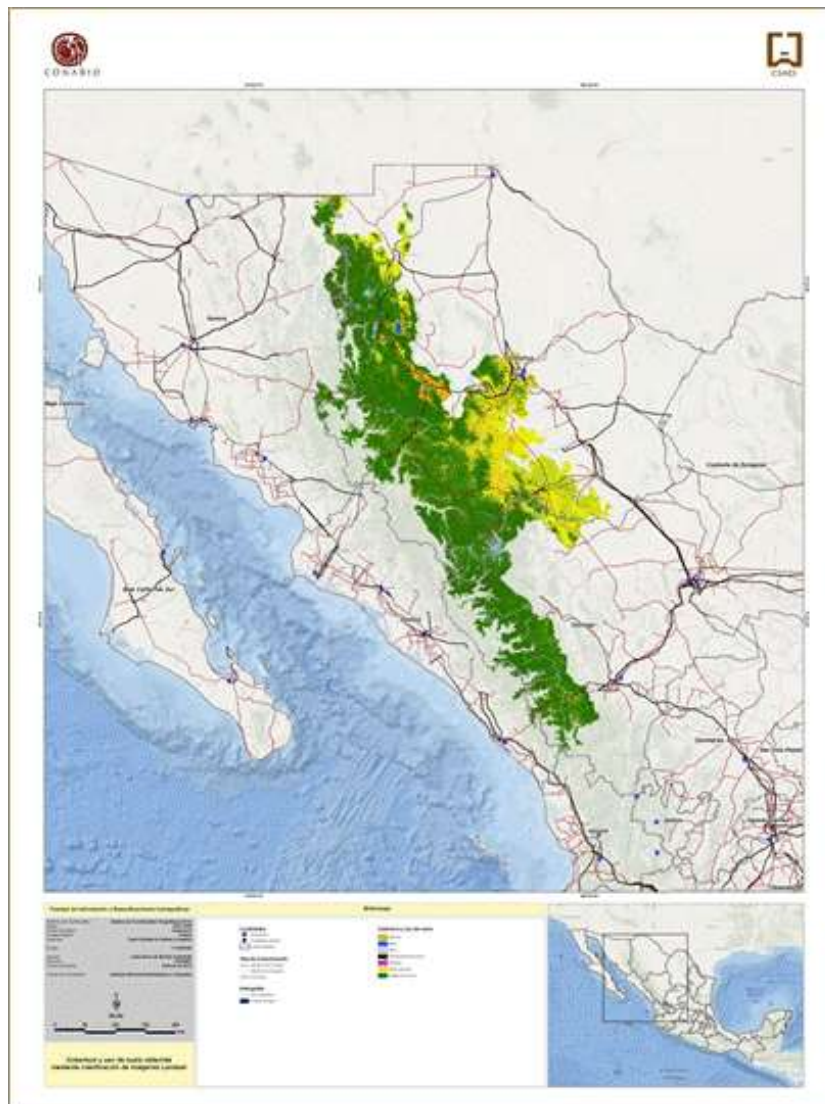


Fig. 8. Distribución de coberturas naturales e inducidas en la SMO, a partir de la clasificación de imágenes Landsat de 2010, en altitudes ≥ 1500 msnm, como área con potencial para la distribución de especies de trucha nativa *Oncorhynchus* sp.

Imágenes SPOT

De manera parcial, se contó con cobertura de imágenes de la constelación de satélites SPOT correspondientes al año 2010. Estas últimas fueron proporcionadas por el Programa ERMEXS-NG (<http://www.siap.gob.mx/ermex-ng/>)

que es desarrollado y administrado conjuntamente por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA). Estas imágenes multiespectrales, con mayor resolución espacial (10 m), se usaron para determinar con mejor precisión el tipo de cobertura a nivel local (considerando las clases previamente definidas), sobre las áreas geográficas para las que se tiene registro de captura de la especie.

Con esta información se realizó una caracterización de mayor detalle espacial para el paisaje de la zona, con énfasis en las zonas para las que se cuenta con registro de la especie. En este caso, la información derivada de los procesos de clasificación de las imágenes tiene como único propósito el proporcionar un marco de referencia geográfica y paisajística, sin que esté comprometido su uso para la modelación. Dada la extensión de la región de estudio, se seleccionaron tres secciones para la clasificación, al norte, centro y sur de la zona de estudio, siendo el área de mayor tamaño la correspondiente al extremo sur de la cuenca del río Fuerte, particularmente en el subsidiario río Verde, donde se cuenta con mayor número de localidades con registro de presencia de la especies (Fig. 9).

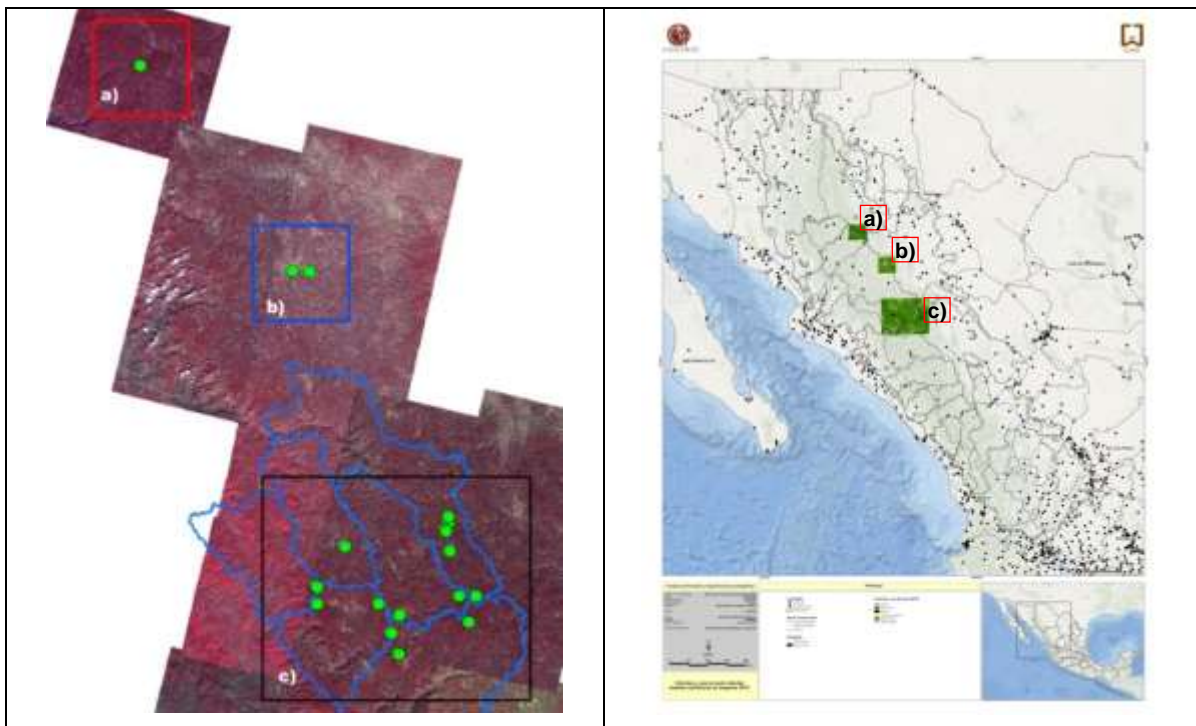


Fig. 9. Vista parcial del área de estudio y cartografía generada con mosaico de imágenes multiespectrales de SPOT (2010) seleccionadas para la clasificación de coberturas de terreno en el área de distribución de truchas nativas de la Sierra Madre Occidental. Los polígonos rectangulares (a, b y c) corresponden a las áreas seleccionadas de manera arbitraria para determinar relación entre coberturas naturales y de origen antrópico.

El resultado de las clasificaciones a partir de imágenes SPOT, que equivalen a poco más del 10% del total del área analizada con imágenes MODIS y Landsat, permitió corroborar que existe un elevado nivel de integridad ambiental, al relacionar las coberturas naturales versus las de origen antrópico, relación que es interpretada como nivel de naturalidad, siendo éste del 100% cuando todas las coberturas identificadas son naturales (bosques, selvas, suelo expuesto, cuerpos de agua) y de 0% cuando todas las coberturas antes mencionadas han sido modificadas en su totalidad, para destinarse a usos de suelo propios de actividades económicas o para uso habitacional en diversas densidades (agricultura, industria, acuicultura, zonas urbanas y rurales).

Del análisis de clasificación del paisaje se observó dominancia de coberturas naturales, que en todos los casos se sitúa por arriba del 90% del total, considerando la vegetación natural (con dominancia de bosques de pino encino) y la cobertura denominada suelo expuesto/pastizales. Por otra parte, las coberturas derivadas de actividades humanas, que incluyen a suelos de uso agrícola y asentamientos humanos no rebasan en conjunto el 5% del total (Tabla 7).

Tabla 7. Extensión de las principales coberturas de terreno en áreas limitadas asociadas a la presencia confirmada de truchas nativas en el norte (a), centro (b) y sur (c) del área de estudio en la SMO, a partir de imágenes SPOT del 2010.

Cobertura/Superficie (ha)	a	b	c	Proporción (%)		
<i>Coberturas naturales</i>						
Vegetación natural	142887	127222	879441	86.4	77.1	83.8
Suelo expuesto / Pastizal	11822	29268	116035	7.2	17.7	11.1
Cuerpos de agua	141	11		<0.1	<0.01	0.0
<i>Subtotal</i>	<i>154850</i>	<i>156501</i>	<i>995476</i>	<i>93.6</i>	<i>94.8</i>	<i>94.9</i>
<i>Coberturas inducidas</i>						
Agricultura	6561	6762	25213	4.0	4.1	2.4
Poblados	288	63	858	0.2	0.0	0.1
Píxeles sin clasificar	3625	1716	27689	2.2	1.0	2.6

<i>Subtotal</i>	10474	8541	53760	6.3	5.1	5.1
TOTAL	165323	165042	1049236			

Estos resultados son similares en lo general a los que se obtuvieron con la clasificación de coberturas y usos de suelo por medio del análisis digital de imágenes MODIS y Landsat, por lo que a partir de los resultados de estos insumos se concluye que el nivel de naturalidad en la zona de estudio es superior al 90%, particularmente en zonas cercanas a las localidades con registro de la especie, lo que deberá validarse y corregirse en su caso, con imágenes de mayor resolución que cubran el área de estudio en su totalidad y puedan ser validadas con observaciones en campo u otra fuente auxiliar de datos.

Con los resultados obtenidos con los distintos sensores incluidos en el presente estudio, se interpreta que no hay diferencia significativa en cuanto a la superficie evaluada para cada cobertura, tanto natural como de origen antrópico, determinadas a partir del análisis digital de imágenes de satélite con distintas resoluciones, tanto espacial como espectral.

Particularmente en los sitios para los que se cuenta con registro de la especie a lo largo de más de 60 años, teniendo el registro más antiguo para *O. chrysogaster* en 1952, los resultados producidos con las imágenes de mayor resolución (SPOT) permiten interpretar la existencia de un ambiente escasamente perturbado, lo cual se ha corroborado en las salidas de campo realizadas, donde se ha observado una reducida presencia de asentamientos humanos y cuando estos existen son de muy baja densidad poblacional. Adicionalmente, las condiciones ambientales en dichas localidades no favorecen particularmente el desarrollo de actividades económicas tales como la agricultura intensiva, por lo que son escasos los terrenos destinados a actividades agrícolas, la mayoría con cultivos de subsistencia (Fig. 10).

Las actividades que se presentan con mayor frecuencia son las relacionadas con usos forestales y minería de baja escala, ambas con riesgos inherentes, tanto por la destrucción de hábitat como por la posible contaminación.

Cabe mencionarse que a raíz de diversos acercamientos con habitantes de la región, se observa un incremento en la conciencia ambiental, señalándose el riesgo de la explotación intensiva de bosques como uno de los principales problemas, por lo que se está intentando la práctica de aprovechamiento forestal con aplicación de estrategias sustentables, la reducción de la explotación forestal a través de programas de empleo temporal y pago por servicios ambientales, o bien redirigiendo los esfuerzos hacia actividades menos invasivas del recurso forestal, siendo el caso del desarrollo de sistemas acuícolas, particularmente el cultivo de trucha arco iris, lo que reduce la explotación de los recursos forestales, pero implica el riesgo de pérdida de diversidad genética con la introducción de especies exóticas, como es el caso de la trucha arco iris *O. mykiss*. Otras situaciones que ponen en riesgo tanto la integridad ambiental, como la permanencia de la especie son la presencia de incendios de origen natural o provocados, la pesca utilizando métodos inapropiados escasamente selectivos y otro tipo de actividades incluyendo la tala forestal y cultivos ilegales (Fig. 10).



Fig. 10. Características de desarrollo en la región y algunas actividades económicas desarrolladas en la región, legales e ilegales, con efecto sobre la conservación de las truchas nativas y los ambientes de los que depende su supervivencia.

Registro de presencias de la especie

Se realizó una serie de acciones tendientes a cubrir los objetivos propuestos, siguiendo los lineamientos requeridos por la CONABIO. En primer término se procedió a la recopilación de información relativa al registro de presencias de la especie y a la elaboración de capas para su incorporación al sistema de información geográfico (SIG).

Como ya se indicó, en función de la propuesta de objetivos particulares, se completó la recopilación de datos históricos de los registros de captura de la especie. Con el apoyo del grupo binacional Truchas Mexicanas (México – Estados Unidos; <http://truchasmexicanas.org/>), ha sido posible esta recopilación, contándose actualmente con una base de datos que integra poco menos de 300 registros de especímenes de trucha, posiblemente de distintas especies nativas de México, de acuerdo con lo comentado anteriormente sobre la posibilidad de que exista un complejo de especies que está siendo estudiado desde el punto de vista genético en distintas instituciones, tanto nacionales como internacionales, particularmente en EUA. De las anteriores existe certeza que 42 registros del total, es decir aproximadamente el 15%, corresponde a *O. chrysogaster*, citándose con esa denominación científica o con la sinonimia *Salmo chrysogaster*.

Sumado a lo anterior, en la mayoría de dichos registros (41 de 42) se cuenta con la posición geográfica correspondiente, con fechas que van de 1952 como la más antigua, hasta fechas recientes que corresponden a capturas realizadas dentro del marco del presente proyecto (Febrero de 2013). En referencia a esta campaña, la captura se realizó utilizando equipo de electropesca, contando con el permiso correspondiente por parte de la SEMARNAT (Oficio SGPA/DGVS/02485/13). Esta modalidad de pesca (Fig. 11) permitió la captura de ejemplares vivos, que en la medida de lo posible fueron manipulados para obtener las muestras biológicas, determinación de algunos indicadores morfométricos y poblacionales (Fig. 13). Algunos de los ejemplares fueron preservados en formol para su posterior inclusión en colecciones ictiológicas, en particular la de la

Universidad de Baja California (CI-UABC), manteniéndose otros con vida, para ser llevados a estanques de cultivo con el fin de que pueda completarse el ciclo de vida en cautiverio y tener la opción de cultivar a la especie en lugar de la especie introducida (*O. mykiss*).

Cabe mencionarse que aunque se realizaron dos campañas durante el proyecto (Febrero y Junio de 2013), no en todos los puntos muestreados se obtuvieron resultados positivos y en algunos de los casos donde se obtuvo captura de especímenes de *Oncorhynchus* sp., estos no necesariamente correspondieron a la trucha dorada mexicana *O. chrysogaster*, por lo que solo se incorporaron dos registros nuevos. Como parte de otro proyecto relacionado (CONACYT CB152893) el registro se ha venido actualizando y lo mismo se hará en el futuro, conforme se sigan realizando nuevos muestreos y registros.



Fig. 11. Proceso de captura de truchas nativas con equipo de electropesca (Smith-Root 15-D POW).y registro de datos en la SMO.

Para el caso de los registros sin posición geográfica se intentó buscar una aproximación a su localización en función de la información disponible (nombre de

localidades, municipio), sin embargo ésta es muy limitada y no fue posible, por lo que no pudieron ser incorporados a la base de datos que se anexa con el presente informe.

Adicionalmente, a partir de la base de datos del grupo Truchas Mexicanas, se tiene poco más de 140 registros que corresponden a especies del género *Oncorhynchus* sp., no identificadas, algunas de las cuales fueron utilizadas para propósitos del análisis geográfico y la modelación de la distribución, en función de que la localidad de registro, las condiciones ambientales y geográficas pueden asumirse como compatibles con las observadas para la especie objeto del presente estudio.



Fig. 12. Registro de datos biológicos y morfométricos de *O. chrysogaster* en campo.

Los datos procedentes de diferentes colecciones y que ya han sido verificados como pertenecientes a *O. chrysogaster*, fueron incorporados a una base de datos, de acuerdo con el protocolo propuesto en el Manual de Procedimiento para el

control de calidad de las Bases de datos para modelar la distribución geográfica de las especies de la CONABIO (2012).

Este protocolo incluye 32 campos que permiten identificar a la especie y ubicar la colección científica que resguarda a los ejemplares de referencia, además de información del sitio de colecta, entre otros datos. El archivo correspondiente se anexa con el presente informe en formato Excel, sin variación con respecto a la base de datos presentada en el primer informe, dado que no se obtuvieron nuevos ejemplares para ingresar a colección alguna, habiéndose tomado exclusivamente una muestra de material biológico (porción de aleta pélvica), en organismos capturados durante una segunda colecta (Junio de 2013).

Con relación al objetivo consistente en el desarrollo de un SIG con la información existente, éste se desarrolló en plataforma ArcGIS v.10, e incluye capas relacionadas con el entorno geográfico y biofísico como datos de referencia, además del modelo resultante de utilizar las variables seleccionadas a partir de WorldClim (<http://www.worldclim.org>) y la altitud derivada de los modelos digitales de elevación (DEM), que se descargan de la internet en formato GeoTiff, con resolución de 30 m y con una extensión que cubre mosaicos de 1 x 1 grado de latitud - longitud (<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex>).

Modelación de área potencial de distribución

Por lo que respecta al proceso general de modelación de la zona con potencial para la distribución de la especie, para cubrir la totalidad del área de estudio fue necesario descargar dos archivos por variable ambiental, los correspondientes a los cuadrantes 12 y 22, como ya se señalaba en el apartado anterior. Ambos cuadrantes fueron posteriormente agregados como mosaico y finalmente recortados para ajustarse a la zona de estudio, que como se ha mencionado, considera los límites de cuencas y los 1500 msnm como la cota límite inferior de distribución de la especie estudiada y en general de los salmónidos que se distribuyen en la sierra Madre Occidental (Fig. 13).

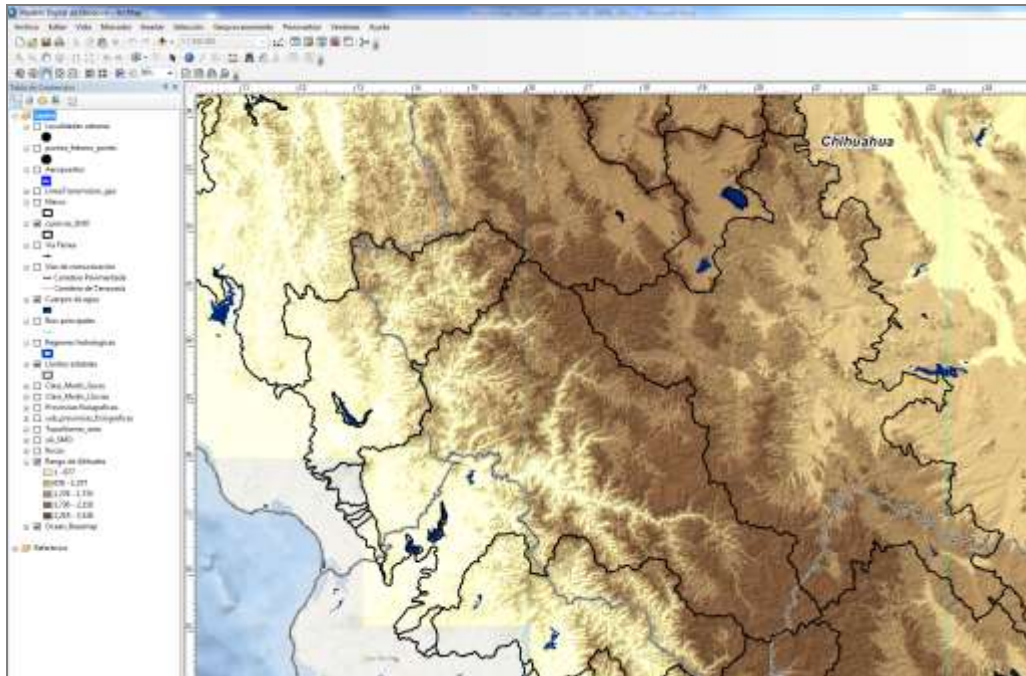


Fig. 13. Despliegue en ArcGis del modelo digital de elevación, ajustado al área de distribución de truchas nativas de México en la Sierra Madre Occidental, definida por los límites de cuenca y altitud de 1500 msnm.

Contando con la información de las distintas variables ambientales, se procedió a generar el modelo de distribución potencial utilizando inicialmente las 19 variables y posteriormente procediendo a su depuración, en función de los resultados que produjo el modelo.

El algoritmo del modelo Bioclim (Busby, 1991), que como otros módulos de análisis en SIG se encuentra incorporado al software DIVA-GIS 7.5 (Hijmans et al., 2012), utiliza los valores correspondientes a los observados en las regiones para las que existe registro de la especie, analiza su distribución y genera los valores estadísticos correspondientes para posteriormente producir cajas de valores por pares de variables climáticas, denominadas envolturas climáticas. El análisis estadístico básico de cada variable dentro de la SMO, acotada a las coordenadas extremas: -112° a -102° longitud oeste y 20° a 32° latitud norte produjo archivos en formato raster (bio*.grd y archivos asociados), conteniendo valores de cada parámetro, mismos que son concentrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Estadísticas básicas de la distribución de valores de las distintas variables ambientales de Bioclim acotadas a la región geográfica definida por las coordenadas extremas -112° a -102° W y 20° a 32° N. Se incluyen los valores mínimos (min), máximo (max), promedio (media) y su respectiva desviación estándar (d.e.).

ID	Variable	min	max	media	d.e.
BIO0	Altitud (msnm).	1500	3269	1611.0	750.3
BIO1	Temperatura media anual	10	27	17.5	4.0
BIO2	Rango de temperatura media diurna	10	21	16.7	1.9
BIO3	Isotermalidad	46	72	57.2	4.6
BIO4	Estacionalidad de la temperatura	220	80	429.5	116.2
BIO5	Temperatura máxima del mes más cálido	19	42	31.8	4.3
BIO6	Temperatura mínima del mes más frío	-8	16	2.6	4.6
BIO7	Amplitud térmica anual	17	40	29.1	4.4
BIO8	Temperatura media del trimestre más húmedo	12	33	21.9	4.1
BIO9	Temperatura media del trimestre más seco	6	28	16.7	4.4
BIO10	Temperatura media del trimestre más cálido	12	33	22.6	4.0
BIO11	Temperatura media del trimestre más frío	2	24	11.8	4.3
BIO12	Precipitación anual	270	2199	699.5	238.6
BIO13	Precipitación del mes más húmedo	60	702	180.5	60.1
BIO14	Precipitación del mes más seco	0	23	6.1	3.4
BIO15	Estacionalidad de la precipitación	72	140	100.3	10.5
BIO16	Precipitación media del trimestre más húmedo	160	1791	455.1	159.6
BIO17	Precipitación media del trimestre más seco	6	80	29.2	13.6
BIO18	Precipitación media del trimestre más cálido	80	1697	363.4	138.4
BIO19	Precipitación media del trimestre más frío	17	277	83.0	43.1

A partir de dichos valores (sitios de entrenamiento) el algoritmo establece las reglas para determinar áreas con clima similar a los observados para la especie estudiada y determina un espacio de distribución potencial interpolando las variables climáticas para cada pixel o celda, dentro de un espacio con afinidades climáticas, siguiendo la distribución percentil determinada para los sitios de entrenamiento. Entre más cercano al percentil 50 (la mediana) más apta es la localidad. Las colas de la distribución no son distinguidas, esto es, el percentil 10 es tratado igual al percentil 90, reduciendo con ello la probabilidad de ocurrencia de sitios que puedan considerarse falsos positivos para propósitos de ubicar la zona de distribución de la especie evaluada (Hijmans y Elith, 2013).

Las envolturas climáticas por especie (*species envelope*) se definen con la construcción de hiper-cajas delimitadas (*bounding hyper-box*) que encierran todos

los registros de la especie dentro del espacio climático definido por las distintas variables. Para caracterizar la caja se crea un sobre rectilíneo en el espacio climático, definido por los registros extremos de las especies en cada eje. Para minimizar los efectos de los *outliers*, los registros de las especies son ordenados a lo largo de cada variable y se consideran únicamente aquellos que caen dentro de un cierto rango percentil de los datos usados para caracterizar los sobres (Murguía, 2012). En este estudio se usó un rango percentil del 95% para caracterizar las envolturas o sobres climáticos.

De manera similar se aplicó la modelación utilizando el algoritmo de Máxima Entropía MAXENT 3.3.3k, desarrollado por Phillips et al. (2006). Este algoritmo se encuentra incorporado dentro del módulo Land Change Modelling > Implications > Habitat suitability/Species distribution modeling del programa IDRISI Selva. Dicho programa genera capas en formato raster (*.rst), mismas que fueron importadas desde el programa ArcGIS 10, dentro del cual fue posible su conversión a formato vectorial y su posterior incorporación al SIG.

Para la aplicación de este último módulo, se utilizaron solamente las variables que fueron seleccionadas a partir de la depuración que se generó a partir del análisis de resultados con Bioclim, por lo que se considera este paso previo como un proceso de análisis exploratorio de datos.

Las capas o variables seleccionadas fueron “apiladas” en un archivo para su análisis simultáneo dentro del ambiente SIG. La selección se hizo en función de la importancia del recurso agua y de los requerimientos de temperatura para la trucha, que ve favorecido su desarrollo en aguas frías, ricas en oxígeno disuelto. Aunque se desconocen los requerimientos fisiológicos de la especie, para la trucha Arcoíris se ha determinado que el óptimo de temperatura es de 12 °C, pudiendo sobrevivir dentro de un rango de 5 a 20 °C, alcanzando niveles críticos a partir de los 25 °C, valores reportados como letales si se mantienen durante periodos prolongados (Lang et al., 1998). Con relación al oxígeno disuelto, se ha determinado que la mayoría de los salmónidos pueden encontrarse en situación crítica cuando los niveles de O₂ disuelto se reducen por debajo de los 5 mg L⁻¹.

Sobre la especie estudiada, son escasos los datos ambientales relacionados con los sitios de colecta, sin embargo se asume que soportan temperaturas mayores que la de especies congénéricas distribuidas en los Estados Unidos. Durante la elaboración del presente estudio se registraron valores de 16 a 20 °C en dos de los arroyos donde hubo colecta en el mes de junio de 2013. En una etapa posterior a la conclusión del proyecto financiado por CONABIO se realizaron nuevas colectas obteniéndose los siguientes valores para algunos de los parámetros hidrológicos evaluados durante los meses de febrero y marzo de 2014 (Tabla 9).

Tabla 9. Valores de calidad de agua obtenidos en la Sierra Madre Occidental, durante los meses de Febrero y Marzo de 2014. (n = 85 registros)

Parámetro	O₂ disuelto (mg L⁻¹)	T °C	Conductividad
Promedio	9.0	11.2	44.1
Desviación Estándar	2.1	20.6	90.0
Máxima	15.0	5.3	12.0
Mínima	4.2	4.1	20.9

Se observa en términos generales que los datos obtenidos se encuentran dentro del rango documentado para trucha arco iris, sin embargo deberá continuarse con el registro hasta documentar adecuadamente las variaciones posibles a lo largo del año.

Es conocido que existe una relación inversamente proporcional entre temperatura del agua y concentración de oxígeno disuelto, que a su vez dependen de la temperatura ambiente y la cantidad de agua procedente de la precipitación, por lo que el número de variables a incorporar en el modelo final se redujo considerablemente, eligiéndose variables relacionadas con limitantes en temperatura y el aporte de agua (precipitación), que están indirectamente relacionadas con la concentración de oxígeno disuelto en el agua.

Modelación con Bioclim

Originalmente se procedió a descargar el total de capas (20) que incluye la base de datos de WorldClim que consiste de la 19 biovariables climáticas y la incorporación de la altitud (Bio0). Sin embargo una vez que se realizó un análisis exploratorio y se determinó la existencia de correlación entre diversas capas, se eliminó a la mayoría de ellas, quedando únicamente aquellas que además de tener sentido desde el punto de vista biológico, representan al conjunto de variables con las que existe una relación directa. El resultado de la matriz de correlación entre el total de variables (Tabla 10), permitió realizar la discriminación de las variables, quedando finalmente tres de éstas aportando información relevante para la modelación; altitud (Bio0), rango de temperatura media diurna (BIO2) y temperatura mínima en el mes más seco (BIO14).

Tabla 10. Matriz de valores del coeficiente de correlación entre las distintas variables ambientales de Bioclim acotadas a la región geográfica definida por las coordenadas extremas -112° a -102° W y 20° a 32° N.

	bio0	bio1	bio2	bio3	bio4	bio5	bio6	bio7	bio8	bio9	bio10	bio11	bio12	bio13	bio14	bio15	bio16	bio17	bio18	bio19
bio0	1.00	-0.95	0.09	0.19	0.15	-0.89	-0.78	-0.03	-0.98	-0.92	-0.97	-0.82	-0.15	-0.30	0.35	-0.40	-0.24	0.25	-0.20	-0.07
bio1	-0.95	1.00	-0.15	0.07	0.10	0.83	0.90	-0.14	0.92	0.96	0.92	0.95	0.18	0.32	-0.43	0.47	0.29	-0.35	0.16	0.00
bio2	0.09	-0.15	1.00	-0.24	0.59	0.32	-0.52	0.86	0.07	-0.20	0.08	-0.33	-0.67	-0.59	0.01	0.06	-0.65	-0.18	-0.44	-0.43
bio3	0.19	0.07	-0.24	1.00	0.90	-0.36	0.34	-0.70	-0.28	0.05	-0.29	0.36	0.41	0.36	-0.03	0.18	0.44	-0.12	0.25	-0.05
bio4	-0.15	-0.10	0.59	-0.90	1.00	0.43	-0.48	0.91	0.28	-0.10	0.29	-0.42	-0.59	-0.52	0.03	-0.14	-0.61	0.04	-0.33	-0.10
bio5	-0.89	0.83	0.32	-0.36	0.43	1.00	0.51	0.43	0.96	0.79	0.96	0.62	-0.22	-0.05	-0.38	0.37	-0.13	-0.34	-0.11	-0.14
bio6	-0.78	0.90	-0.52	0.34	0.48	0.51	1.00	-0.56	0.69	0.88	0.68	0.98	0.48	0.55	-0.35	0.39	0.56	-0.23	0.34	0.16
bio7	-0.03	-0.14	0.86	-0.70	0.91	0.43	-0.56	1.00	0.20	-0.17	0.21	-0.43	-0.71	-0.63	0.01	-0.06	-0.71	-0.08	-0.46	-0.30
bio8	-0.98	0.92	0.07	-0.28	0.28	0.96	0.69	0.20	1.00	0.89	1.00	0.75	-0.02	0.14	-0.37	0.38	0.08	-0.29	0.07	0.00
bio9	-0.92	0.96	-0.20	0.05	0.10	0.79	0.88	-0.17	0.89	1.00	0.89	0.91	0.26	0.37	-0.31	0.30	0.33	-0.21	0.20	0.15
bio10	-0.97	0.92	0.08	-0.29	0.29	0.96	0.68	0.21	1.00	0.89	1.00	0.75	-0.05	0.11	-0.39	0.39	0.05	-0.32	0.03	-0.04
bio11	-0.82	0.95	-0.33	0.36	0.42	0.62	0.98	-0.43	0.75	0.91	0.75	1.00	0.37	0.47	-0.39	0.47	0.47	-0.32	0.27	0.04
bio12	-0.15	0.18	-0.67	0.41	0.59	-0.22	0.48	-0.71	-0.02	0.26	-0.05	0.37	1.00	0.96	0.41	-0.08	0.97	0.53	0.86	0.70
bio13	-0.30	0.32	-0.59	0.36	0.52	-0.05	0.55	-0.63	0.14	0.37	0.11	0.47	0.96	1.00	0.31	0.11	0.98	0.42	0.88	0.61
bio14	0.35	-0.43	0.01	-0.03	0.03	-0.38	-0.35	0.01	-0.37	-0.31	-0.39	-0.39	0.41	0.31	1.00	-0.62	0.26	0.89	0.39	0.65
bio15	-0.40	0.47	0.06	0.18	0.14	0.37	0.39	-0.06	0.38	0.30	0.39	0.47	-0.08	0.11	-0.62	1.00	0.14	-0.71	0.03	-0.59
bio16	-0.24	0.29	-0.65	0.44	0.61	-0.13	0.56	-0.71	0.08	0.33	0.05	0.47	0.97	0.98	0.26	0.14	1.00	0.35	0.87	0.54
bio17	0.25	-0.35	-0.18	-0.12	0.04	-0.34	-0.23	-0.08	-0.29	-0.21	-0.32	-0.32	0.53	0.42	0.89	-0.71	0.35	1.00	0.49	0.84
bio18	-0.20	0.16	-0.44	0.25	0.33	-0.11	0.34	-0.46	0.07	0.20	0.03	0.27	0.86	0.88	0.39	0.03	0.87	0.49	1.00	0.60
bio19	-0.07	0.00	-0.43	-0.05	0.10	-0.14	0.16	-0.30	0.00	0.15	-0.04	0.04	0.70	0.61	0.65	-0.59	0.54	0.84	0.60	1.00

Para dichas variables se obtuvo la distribución de frecuencias a partir de 28 puntos de presencia de *O. chrysogaster* validados como no duplicados de un total de 68 puntos disponibles. La tabla 11 muestra el resumen estadístico correspondiente.

Tabla 11. Datos estadísticos de la distribución (cuartiles, Q) de las variables ambientales asociadas con la distribución geográfica de registros de *O. chrysogaster*. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diaria; Bio14. Precipitación del mes más seco

	Bio0	Bio02	Bio14
Mínimo	2121	15.60	9.0
Q1	2408	16.38	12.0
Mediana	2470	17.70	14.0
Media	2489	17.33	13.3
Q3	2640	18.30	14.3
Máximo	2844	18.70	19.0

Ejecutando el modelo Bioclim con DIVA-GIS 7.5, se obtuvo la distribución de las variables con base en 28 puntos de entrenamiento (presencia) válidos. El resultado se presenta a continuación (Fig. 14).

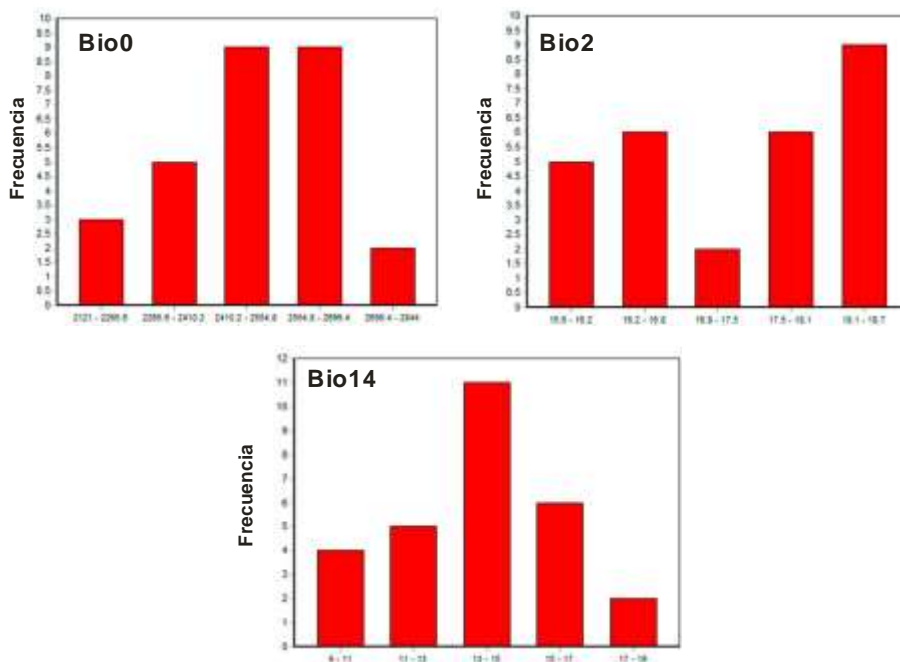


Fig. 14. Distribución de valores de variables ambientales de Bioclim, partiendo de 28 registros validos de presencia de *O. chrysogaster* en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diaria; Bio14. Precipitación del mes más seco

De manera similar se presentan los resultados de la distribución acumulada de las frecuencias. Con el método del recorrido intercuartílico (IQR), definiendo las vallas internas con el 1.5 del IQR no se detectaron *outliers* para ninguna de las tres variables analizadas (Fig. 15).

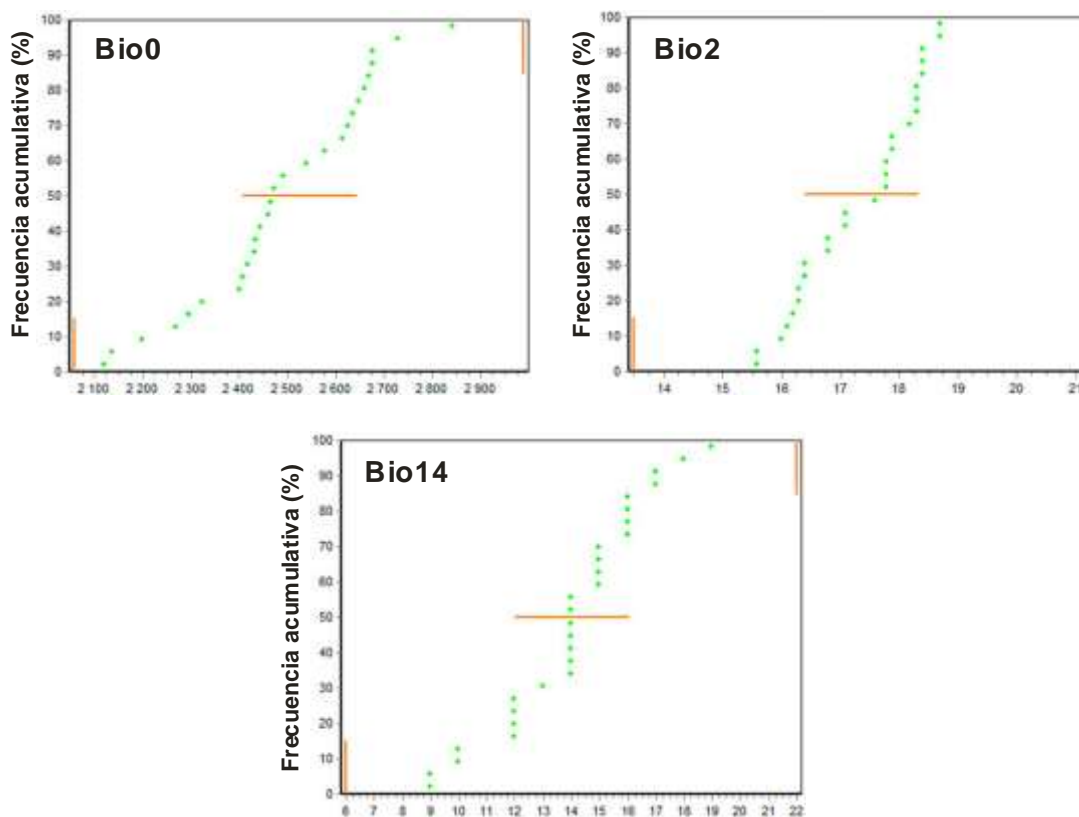


Fig. 15. Frecuencia acumulada de valores de variables ambientales de Bioclim, partiendo de registros validos de presencia de *O. chrysogaster* en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diurna; Bio14. Precipitación del mes más seco

Las envolturas climáticas que se produjeron por combinación de dos variables climáticas establecen los límites correspondientes al percentil 95% (Fig. 16).

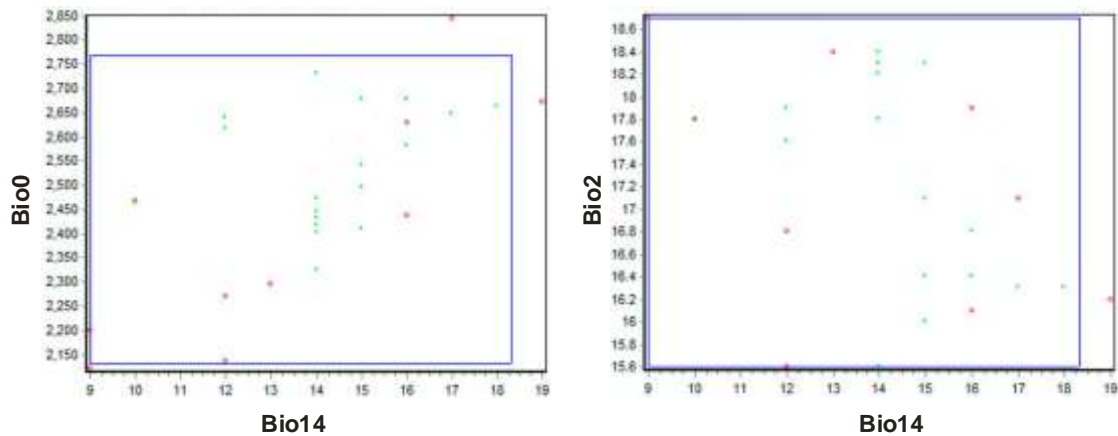


Fig. 16. Envolturas ambientales a partir de pares de variables ambientales, definidas por la ocurrencia de *O. chrysogaster*, de acuerdo a los valores observados en Bioclim. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diaria; Bio14. Precipitación del mes más seco

La modelación con Bioclim generó un mapa con valores que fueron clasificados de acuerdo a su aptitud ambiental para la distribución de *O. chrysogaster*, dividiéndose el área geográfica en seis categorías de acuerdo a la distribución estadística observada. Las áreas quedan clasificadas como No aptas; Baja aptitud (percentil 0 - 2.5); Aptitud media (percentil 2.5 - 5); Aptitud alta (percentil 5 - 10); Aptitud muy alta (percentil 10 - 20); Excelente (percentil 20 - 44).

A partir de los resultados se observan áreas de distribución potencial de la trucha en seis cuencas de la SMO que tienen desembocadura en el Golfo de California, correspondientes a los ríos Yaqui, Mayo, Fuerte, Sinaloa y Culiacán, además de los ríos Nazas y Conchos, este último principal tributario del río Bravo (con desembocadura en el Golfo de México). Para los ríos Yaqui, Mayo y Sinaloa, el área geográfica con posibilidades de localización de la especie es muy reducida. Las más altas probabilidades para la localización de la trucha *O. chrysogaster*, se dio dentro de la cuenca del río Fuerte (Fig. 17).

Los escasos antecedentes biológicos para la especie señalan que existe una evidente diferenciación genética que sugiere la existencia de un complejo de especies cuya distribución se restringe a los límites de cuenca (Hendrickson, 2005) y particularmente para *O. chrysogaster* se han registrado ejemplares dentro de los límites de las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán, en altitudes

superiores a los 1500 msnm.

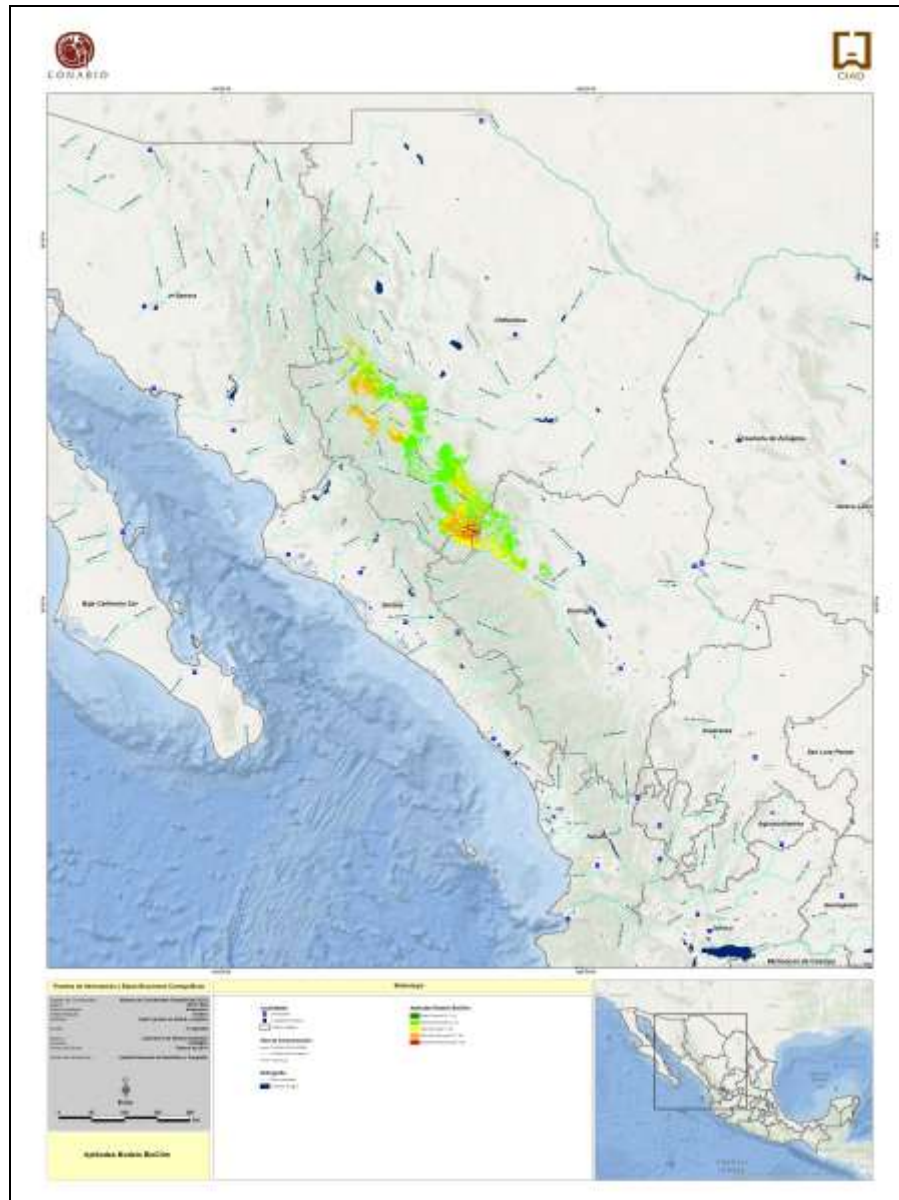


Fig. 17. Aproximación a la distribución potencial de *O. chrysogaster* en la SMO, modelada a partir de las variables climáticas de Bioclim. En escala cromática, la probabilidad de ocurrencia de la especie.

Por lo anterior, el modelo generado a través de la aplicación del algoritmo incorporado en Bioclim, se asumió como parte de un proceso de tipo exploratorio que permitiera continuar con la modelación hasta obtener una mejor aproximación a la distribución potencial de la especie. En ese sentido, se inició un proceso de

validación del modelo utilizando el paquete denominado *Species Distribution Modeling* también conocido como Dismo v. 0.8-17 dependiente del lenguaje de programación R v. 3.0.1.

La respuesta de las variables ambientales consideradas indican claramente que existe una distribución unimodal que representa el óptimo para la especie en cualquiera de las tres variables consideradas (Fig. 18).

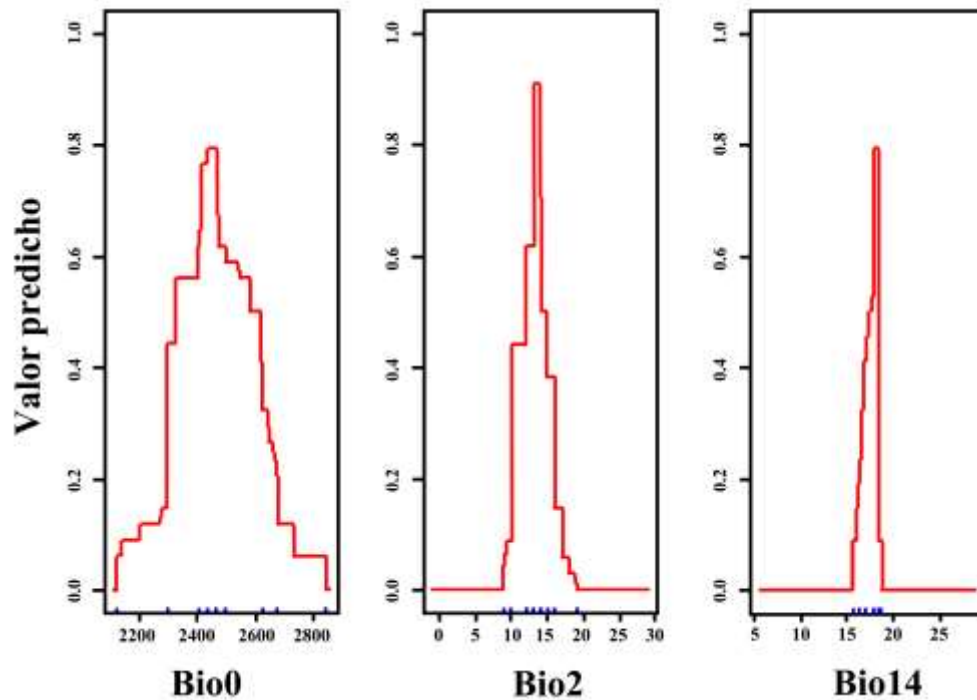


Fig. 18. Respuesta de variables ambientales a la presencia de *O. chrysogaster* en función de sitios de entrenamiento a partir de registros de presencia de la especie en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diaria; Bio14. Precipitación del mes más seco

Partiendo de dichas variables, se estima que las áreas con mayor potencial para la distribución de trucha se encuentran en altitudes próximas a los 2500 m, con rango medio diario de entre 17 y 18 °C y precipitación mínima en el mes más seco de 17 a 18 mm.

Los estudios previos sobre truchas nativas proponen su presencia a partir de los 1500 msnm, pero con base en los registros históricos, que no incluyen datos de altitudes menores, se estableció el valor antes mencionado.

Para validar el modelo, con el software DIVA-GIS se generaron de manera

aleatoria 132 puntos de prueba, 20 presencias y 112 pseudoausencias (fondo o *background*), sobre un área de 115 174 km², el 32% de la SMO, definida por las seis cuencas con alguna probabilidad de encontrar truchas de acuerdo a los resultados del modelo Bioclim y por altitudes iguales o mayores a los 1500 msnm. Los 132 puntos de prueba fueron exportados de manera separada a archivos RData (uno para presencias y otro para pseudoausencias) con el fin de ejecutar la evaluación con el software Dismo (R), generándose los siguientes resultados derivados de un análisis tipo Característica Operativa del Receptor o ROC por sus siglas en inglés (Receiver Operating Characteristic), que generan una curva convexa a partir de la relación entre los parámetros conocidos como sensibilidad (TPR, también conocida como tasa de positivos verdaderos) y la especificidad (TNR, que es la tasa de falsos positivos).

El ROC es un excelente método para evaluar la validez de un modelo que predice la ocurrencia de una clase (especie), por comparación de un mapa de susceptibilidad que representa la verosimilitud de que la clase ocurra (e.g. los generados por Bioclim o Maxent) y un mapa booleano, mostrando que la clase (e.g. puntos de prueba) existe dentro del área de distribución predicha.

Como parte del procedimiento se evalúa el área bajo la curva (AUC), que determina la probabilidad de que un positivo verdadero sea evaluado con mayor precisión, generando un ajuste perfecto cuando el valor de AUC = 1.

El AUC es igual a la verosimilitud de que un punto de presencia seleccionado al azar se localice en una celda (de una imagen raster) con una alta probabilidad para la ocurrencia de la especie que un punto de ausencia seleccionado también al azar. El AUC puede ser interpretado como la verosimilitud de que un punto de presencia seleccionado al azar se localice en una celda con una alta probabilidad de ocurrencia de la especie que un punto generado al azar (Phillips et al. 2006; Scheldeman y Zonneveld, 2011).

El área fraccional predicha (fractional predicted área) en el eje de las X de la gráfica ROC es la fracción del área total de estudio donde se predice la presencia de la especie, mientras que la sensibilidad del eje Y es la proporción de puntos de presencia en el área de ocurrencia modelada sobre el número

total de puntos de presencia actuales (Phillips and Dudik, 2008).

Tomando como base este marco teórico se obtuvieron los siguientes resultados para el diagnóstico.

Clase : Evaluación del modelo

n presencias : 20

n ausencias : 112

AUC : **0.854**

cor : 0.3745

max TPR+TNR en : 0.01460588

La curva que corresponde a los resultados anteriores se presenta a continuación, observándose que se presentan valores altos de sensibilidad de manera continua (Fig. 19).

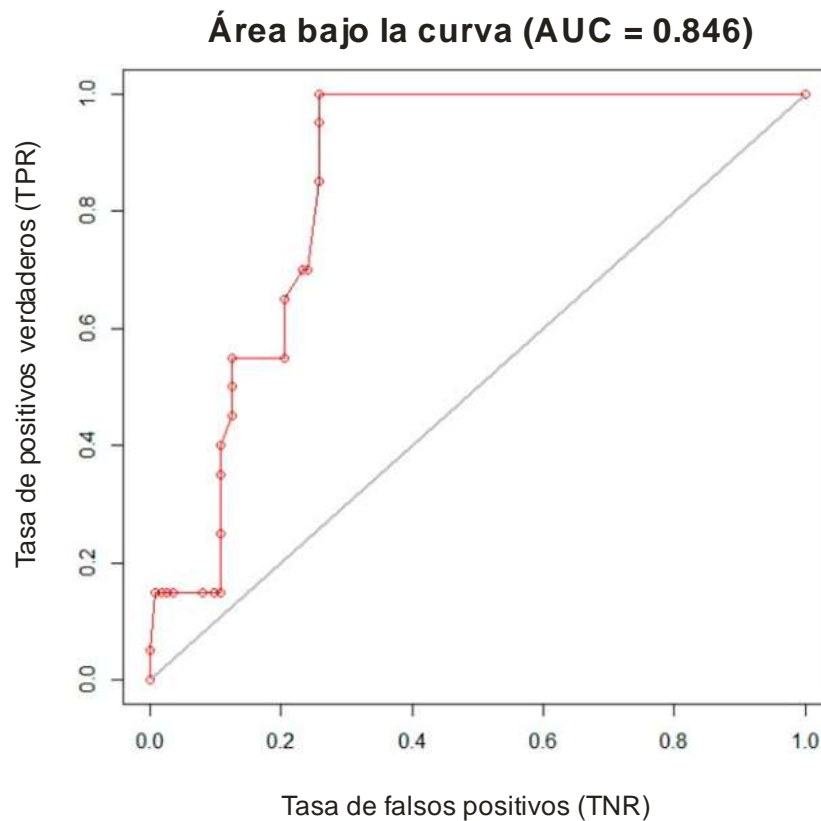


Fig. 19. Curva de respuesta al análisis de Característica Operativa del Receptor o ROC. AUC. Área bajo la curva.

El área bajo la curva puede adquirir valores que van de 0.5 a 1.0, siendo inválidos cuando son iguales a 0.5 e incrementando su nivel de certeza conforme se acerca a 1.0. Con esas consideraciones Araujo et al. (2005) proponen una clasificación de los valores de AUC, donde además de los valores inválidos, los valores superiores a 0.5 puedan clasificarse con las categorías de Malo a partir de que adquieren valores $0.6 > AUC \leq 0.7$, Aceptable si $0.7 > AUC \leq 0.8$; Bueno si $0.80 > AUC \leq 0.9$ y Excelente cuando $AUC > 0.9$. Bajo un escenario donde se generó el ajuste utilizando 68 puntos de presencia, de los cuales solo se validaron 28, el resultado obtenido ubica al modelo propuesto como Bueno.

De la evaluación del modelo se determinó un umbral para transformar las predicciones del modelo (observadas como probabilidades, distancias o similitudes) a un sistema binario (presencia o ausencia), con base en las opciones que se ofrecen en el paquete de Dismo (R). Las posibilidades incluyen la aplicación del coeficiente de Kappa, generándose el umbral en el cual el valor del coeficiente es mayor (kappa máximo). Adicionalmente se puede utilizar la opción Spec_sens, a partir de la cual el umbral se determina como el valor en el cual la suma de la sensibilidad (tasa de positivos verdaderos) y especificidad (tasa de falsos negativos) es mayor. En este caso se obtuvo un valor de este último indicador igual a 0.0146, utilizándose el mismo para la transformación del modelo producido en Bioclim a valores binarios (Fig. 20), estimándose un área potencial de distribución de *O. chrysogaster* de 14969 km², el 4% de la SMO, en el entendido que solo se encontrará a la trucha en los cauces dentro de esta área.

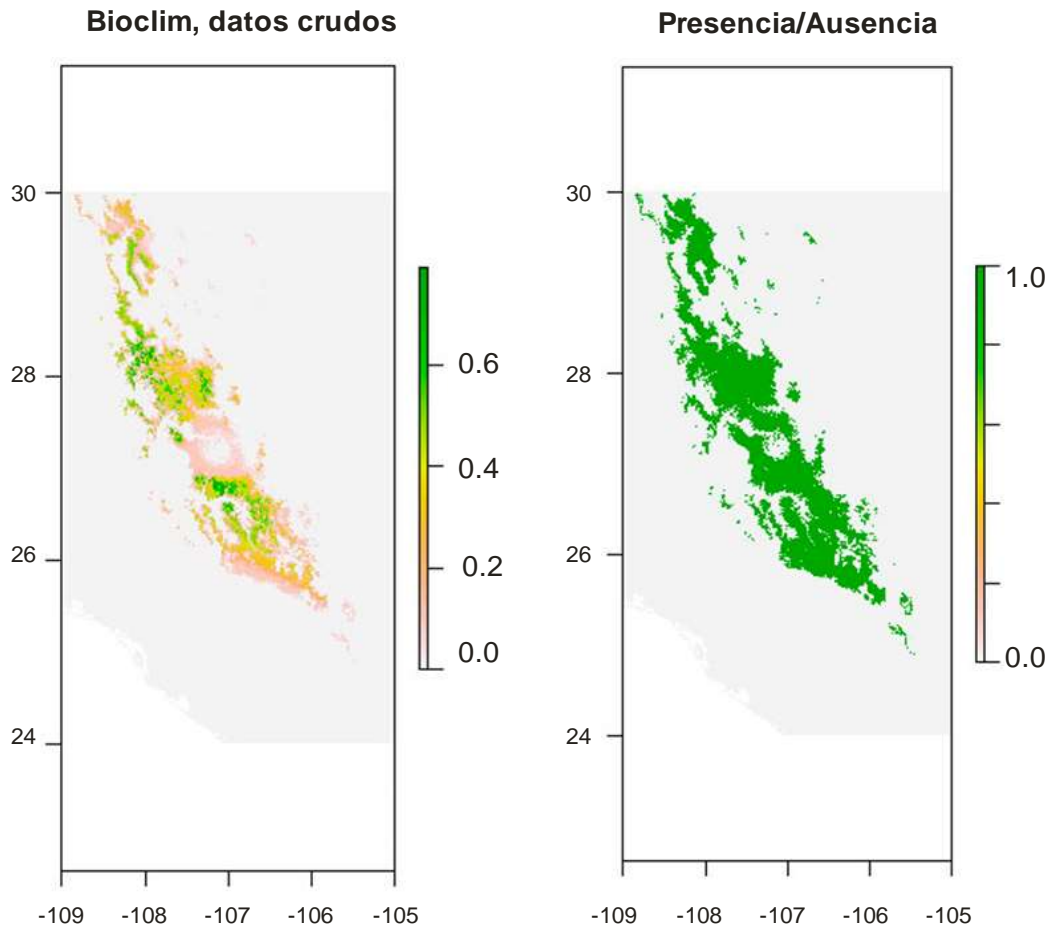


Fig. 20. Modelo de distribución potencial de *O. chrysogaster* producido con el algoritmo desarrollado en Bioclim y modelo binario (ausencia/presencia), generado a partir del umbral definido por la relación entre presencias verdaderas y falsas presencias.

Modelación con Maxent

Con base en los resultados derivados de Bioclim, para la modelación con Maxent el área de estudio se acotó de manera exclusiva a las cuencas para las que se predijo previamente la probabilidad de encontrar trucha de la especie *O. chrysogaster* con Bioclim, para altitudes igual o mayores a 1500 msnm.

En principio la salida cruda de Maxent permitió determinar la mayor similitud ambiental para la ocurrencia de la trucha en los límites de las cuencas Fuerte y Sinaloa (Fig. 21).

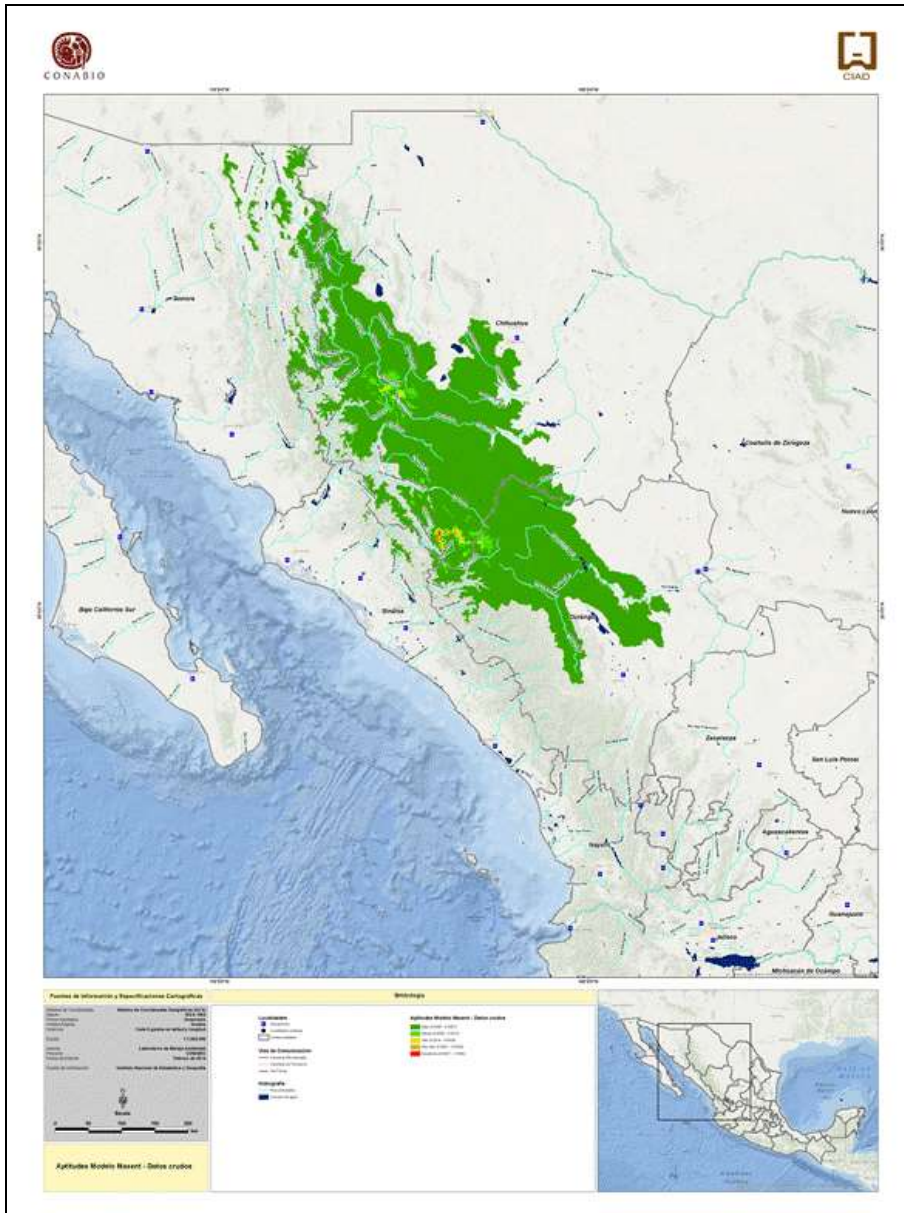


Fig. 21. Aproximación a la distribución potencial de *O. chrysogaster* en la SMO, modelada con Maxent. En escala cromática, la probabilidad de ocurrencia de la especie.

Aplicando la salida logística de Maxent, se obtuvo un resultado más depurado y que permite determinar las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de la especie estudiada (Fig. 22). Esta aproximación predice las probabilidades de ocurrencia más altas en la confluencia de los límites de las cuencas de los ríos Yaqui Fuerte y Conchos, además de una segunda región situada en los límites entre las cuencas de los ríos Fuerte, Sinaloa y Culiacán.

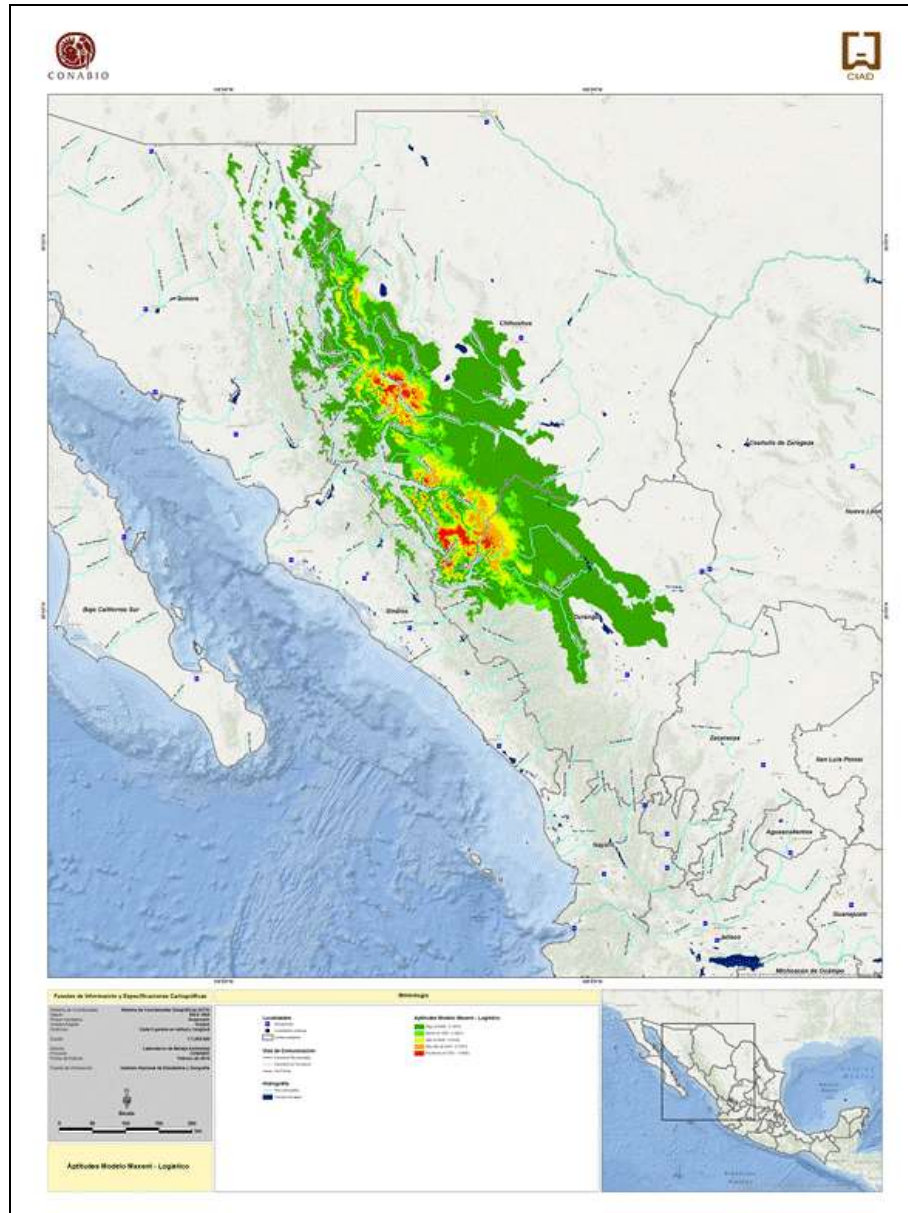


Fig. 22. Aproximación a la distribución potencial de *O. chrysogaster* en la SMO, modelada con Maxent, salida logística. En escala cromática, la probabilidad de ocurrencia de la especie.

La contribución relativa de las variables ambientales al modelo Maxent fue de 61.5% de Bio14, 35.3% de Bio0 (altitud) y 3.2% de Bio2 (Fig. 23)

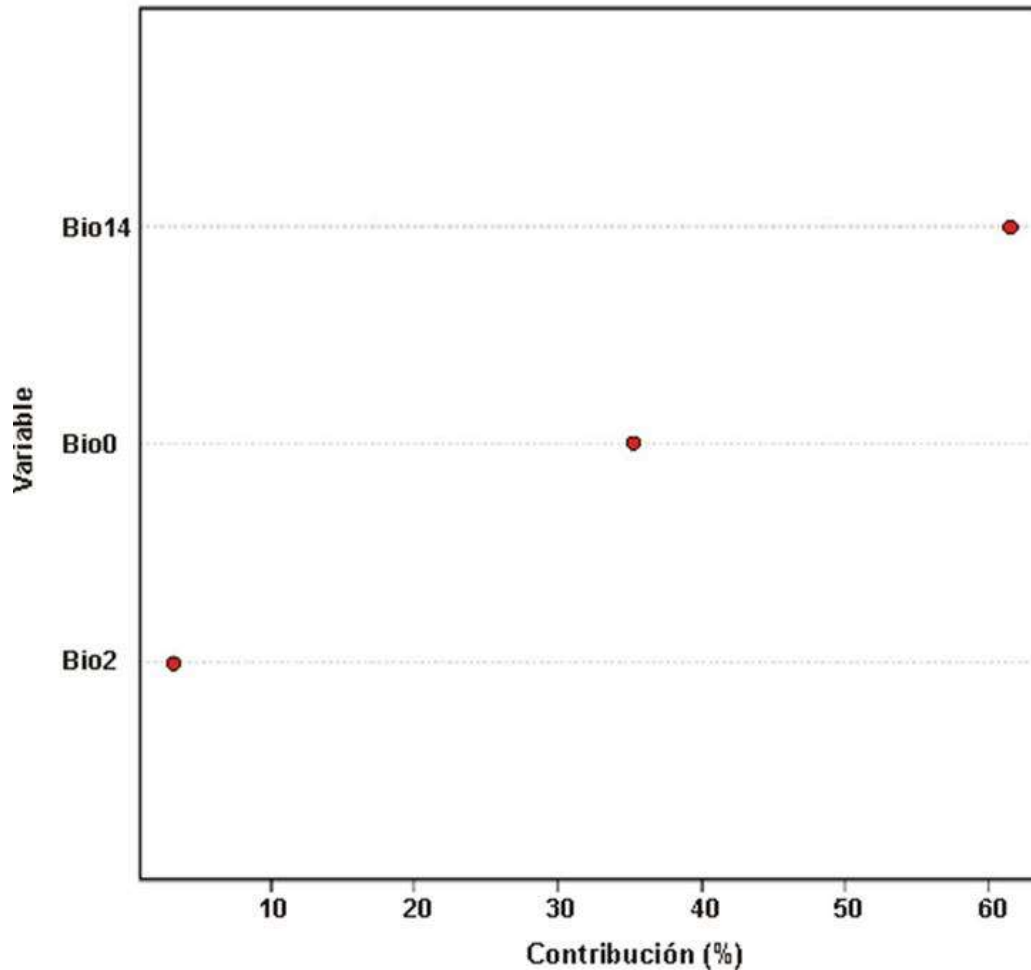


Fig. 23. Contribución de las tres variables ambientales para la modelación de distribución potencial de trucha *O. chrysogaster* en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diurna; Bio14. Precipitación del mes más seco

Asimismo, el análisis producido a través de Maxent incluye como parte de sus salidas, la respuesta observada para cada variable evaluada, proporcionando una estimación de la probabilidad de ocurrencia de la especie dentro del intervalo de valores considerado, mismo que se establece a partir de los datos de entrada, estableciéndose valores mínimos y máximos y los valores con mayor probabilidad como se observa en la figura 24.

Con base en los resultados que surgen del análisis, se estima que la mayor probabilidad de encontrar a la trucha mexicana, utilizando el método de estimación logística, corresponde a sitios con altitudes entre 2400 y 2800 msnm, a partir de

un rango medio diario de temperatura de 16 °C y con una precipitación mínima en el mes más seco de 20 mm.

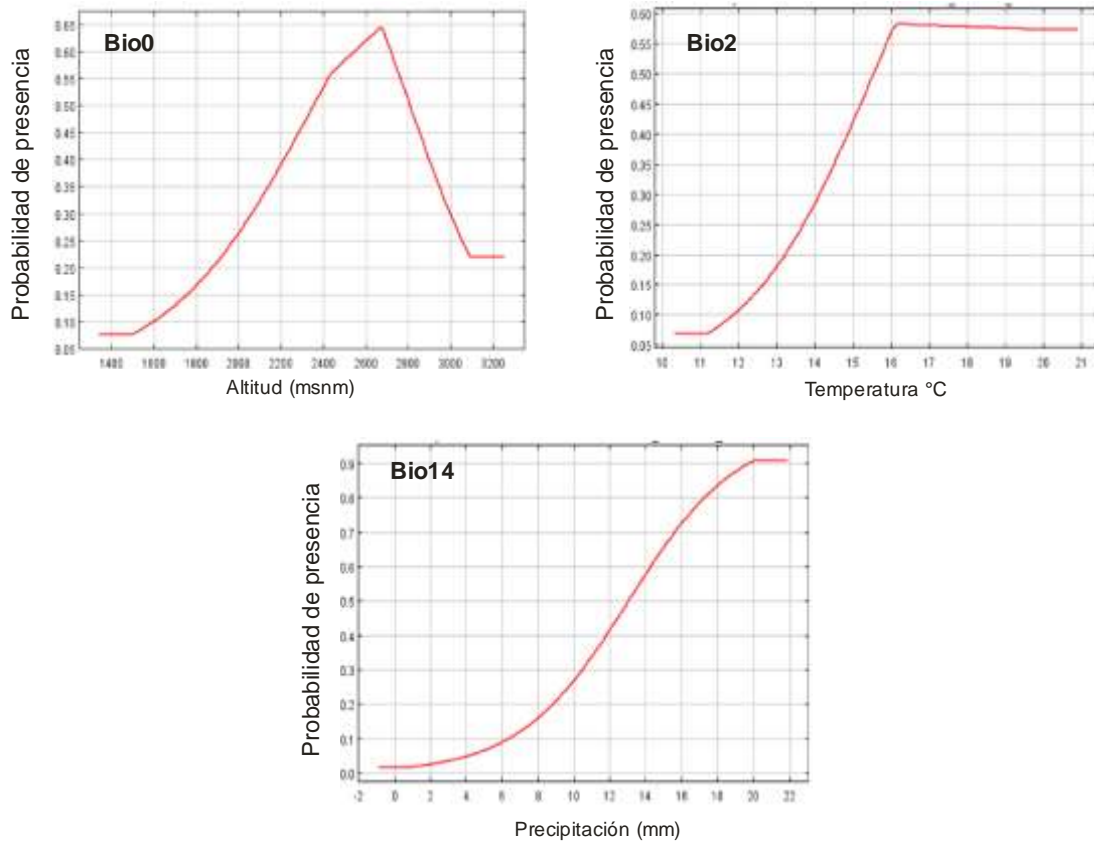


Fig. 24. Contribución de las tres variables ambientales para la modelación de distribución potencial de trucha *O. chrysogaster* en la SMO. Bio0. Altitud (msnm); Bio2. Rango de temperatura media diaria; Bio14. Precipitación del mes más seco

A partir de los resultados obtenidos se realizó nuevamente el análisis tipo ROC para tener una aproximación de la validez del modelo. Para ello se generó una selección aleatoria de puntos de presencia dentro del programa Maxent, obteniéndose nuevamente una curva convexa que monótonicamente fue incrementando su valor al adicionarse los puntos de control o datos de presencia verdadera (Fig. 25).

Sensibilidad vs 1- Especificidad *O. chrysogaster*

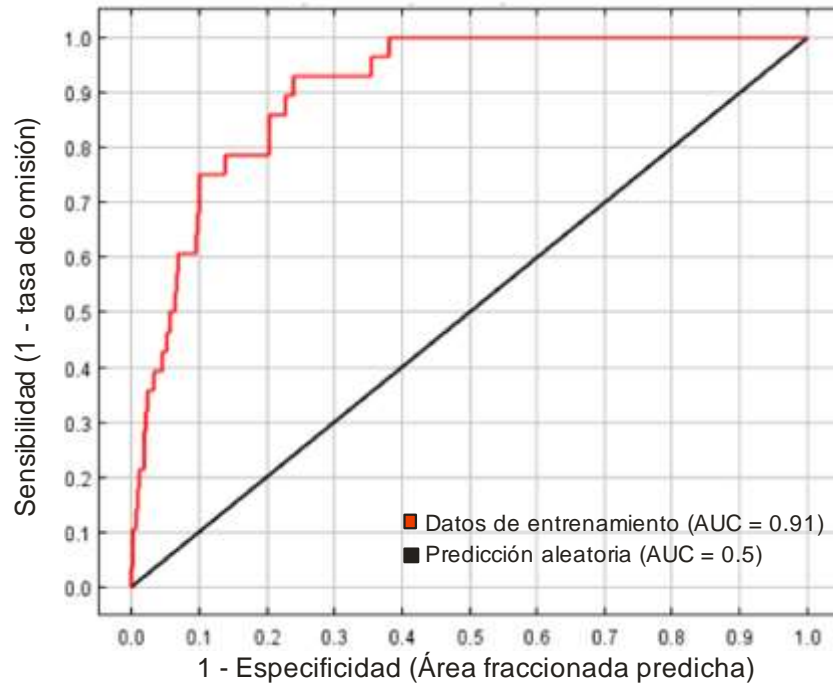


Fig. 25. Curva de respuesta al análisis de Característica Operativa del Receptor o ROC, con base en el modelo Maxent. AUC. Área bajo la curva.

Para estandarizar criterios, la evaluación del modelo producido por Maxent siguió el mismo procedimiento que el utilizado en Bioclim, utilizando 20 datos de presencia y 112 de ausencias seleccionadas al azar. La evaluación se realizó con el programa Dismo en R, obteniéndose los siguientes resultados:

Clase : Evaluación del modelo
n presencias : 20
n ausencias : 112
AUC : 0.9151786
cor : 0.6053867
max TPR+TNR en : 0.2284077

De acuerdo con esos resultados, la curva producida con dicho programa siguió una tendencia similar a la anterior (Fig. 26), con un valor similar del área bajo la

curva (AUC), por lo que ambos resultados pueden categorizarse como Excelentes, de acuerdo a los criterios propuestos por Araújo et al. (2005). Estos resultados permiten concluir que el modelo producido con Maxent es mejor que el que se obtuvo previamente con la aplicación del modelo Bioclim.

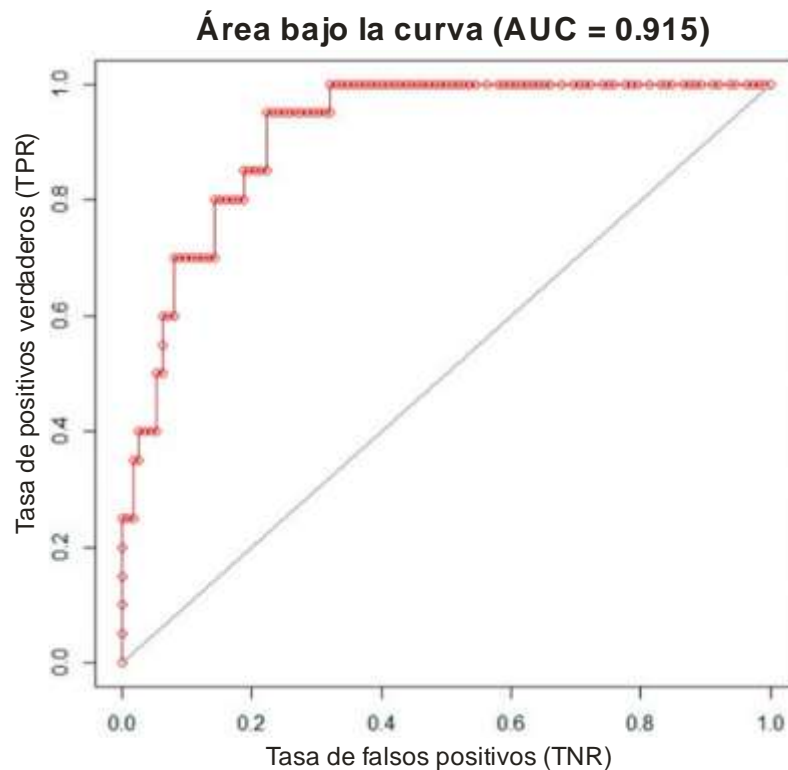


Fig. 26. Curva de respuesta al análisis de Característica Operativa del Receptor o ROC. AUC. Área bajo la curva.

El umbral asociado con este modelo es de 0.2284, generándose los modelos geográficos a partir de la selección de datos con igual o superior valor (Fig. 27).

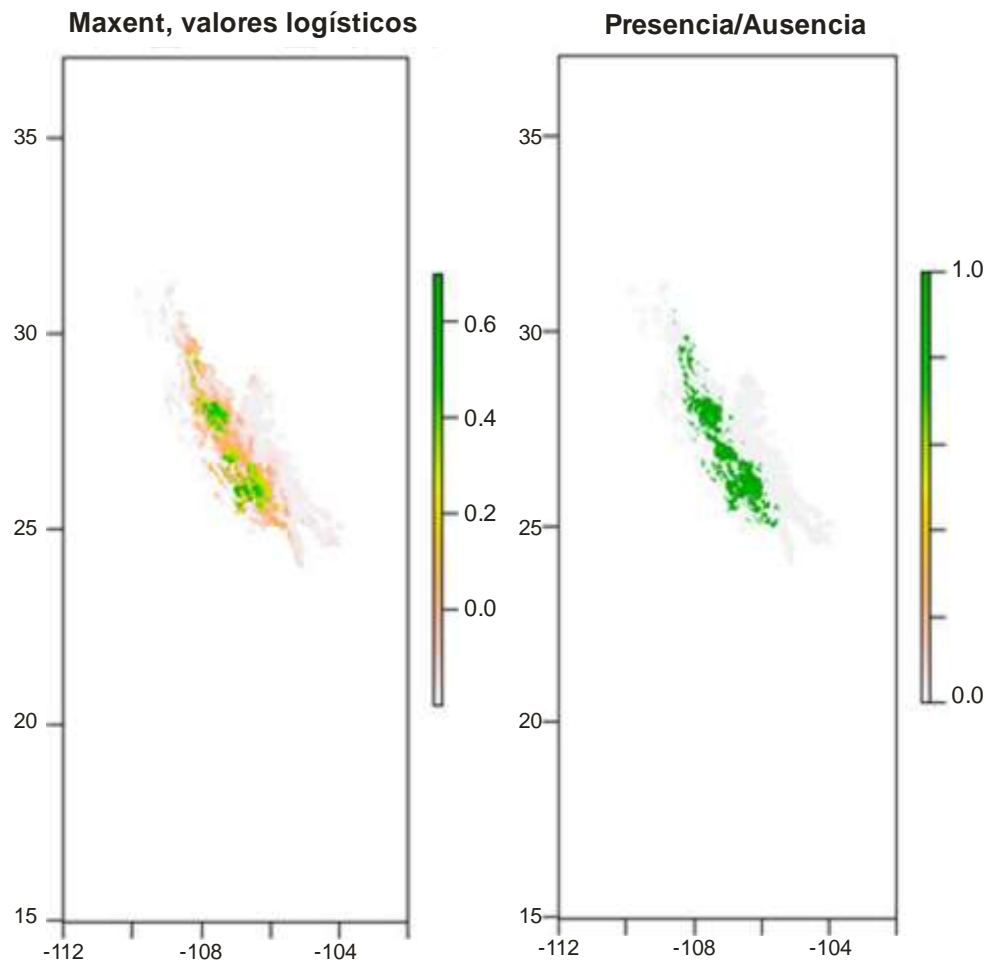


Fig. 27. Modelo de distribución potencial de *O. chrysogaster* producido con Maxent (modelo logístico) y modelo binario (ausencia/presencia), generado a partir del umbral definido por la relación entre presencias verdaderas y falsas presencias.

CONSIDERACIONES FINALES

El objetivo central de modelar la distribución potencial de la trucha nativa *O. chrysogaster*, nativa de México, con base en el análisis de datos de presencia y variables ambientales se cumplió satisfactoriamente, generándose dos modelos basados en las aproximaciones metodológicas de Bioclim y Maxent.

Aunque existen similitudes entre ambos modelos, el análisis para su validación basado en la técnica ROC (Característica Operativa del Receptor), permite inferir que el modelo desarrollado a partir de Maxent es ligeramente superior, pues su capacidad predictiva es mejor que la de Bioclim. En ambos casos la validación se llevó a cabo con los mismos datos para permitir la comparación.

A diferencia de lo propuesto por diversos autores, la mayoría integrantes del grupo binacional Truchas Mexicanas, ambos modelos predicen una distribución localizada a altitudes mayores de 2000 msnm, por encima de los 1500 msnm que se ha asignado como límite altitudinal de distribución de las truchas nativas mexicanas en su conjunto.

No existen evidencias suficientes para dar por válido uno u otro dato, ya que el número de registros con presencias validadas para la especie es relativamente reducido y se ha concentrado en dos tributarios del río Fuerte, por lo que es necesario ampliar dicho registro y continuar con el modelado de distribución de la especie, con base en la información que se vaya adicionando.

Es importante señalar que el análisis de paisaje, realizado a través de la clasificación de imágenes satelitales, de fechas recientes, pero con distinta resolución espacial, permiten proponer la existencia de bajo impacto ambiental, con predominio de coberturas naturales y escaso desarrollo económico, lo que hace presuponer condiciones adecuadas para la permanencia de las truchas en la región, si bien como se señala, existen actividades que pueden poner en riesgo si no a la especie en su totalidad, si a las poblaciones más expuestas a dichas actividades, entre otras la acuicultura y la minería.

Así, esta aproximación permite concluir que si bien la estructura del paisaje mantiene condiciones adecuadas para sostener a las poblaciones analizadas, el riesgo que conlleva el crecimiento de la industria acuícola, enfocada en el cultivo de una especie de trucha exótica (*O. mykiss*), que además de estar considerada dentro de las principales amenazas como especie exótica, puede tener impacto sobre el genoma de las especies nativas por efecto de una posible introgresión genética que se está valorando actualmente por parte del equipo que participó en la presente investigación.

En general, los resultados del presente proyecto pueden considerarse positivos, si bien no definitivos para la especie y dado el interés que está cobrando el estudio de estas especies, en virtud de su vulnerabilidad ante la posibilidad del cambio climático y de la introducción de especies exóticas, particularmente la trucha arco – iris con propósitos de cultivo, es de esperarse que en el corto plazo se vayan afinando los límites de distribución de la especie.

Aunque el presente informe es el primero que se produce para la especie con fondos exclusivamente nacionales, dado que hasta ahora la mayor parte de los recursos económicos para la exploración de esta importante región y sus recursos ícticos procedían de organizaciones internacionales, más concretamente de los Estados Unidos de América, no es el único que el estado mexicano esté financiando.

Actualmente el equipo que participó en este proyecto está desarrollando otro relacionado con *O. chrysogaster* y otras truchas nativas de México en la SMO (“El paisaje genético, nuevo enfoque multiescala para el estudio de poblaciones de truchas nativas en situación de riesgo en la Sierra Madre Occidental”. Ref. CONACYT CB-2010-01-152893). Dentro de este proyecto se contemplan diferentes salidas de campo para incrementar el número de registros de presencia y al mismo tiempo para coleccionar material biológico que permita definir la existencia de un mayor o menor número de especies en la región.

Contando con este apoyo, se pretende ir actualizando la base de datos y generar nuevos modelos, en principio utilizando nuevamente Maxent, dado el resultado que se obtuvo. El trabajo de campo a realizar también permitirá verificar

in situ las bondades del modelo generado, siendo compromiso del equipo de trabajo, mantener informada a la CONABIO sobre las nuevas adiciones y posibles actualizaciones de los modelos de distribución que se generen en el futuro.

AGRADECIMIENTOS

En primer término se agradece el apoyo económico otorgado por la CONABIO para la conclusión del presente estudio, así como su amable disposición para atender nuestras solicitudes. Se agradece también el apoyo y asistencias de los Doctores Francisco García de León (CIBNOR), Gorgonio Ruiz Campos y Faustino Camarena (UABC), durante el trabajo de campo, que no se hubiera logrado sin su experiencia, equipo y permisos de pesca. Al grupo binacional México-Americano “Truchas Mexicanas”.

REFERENCIAS

- Araujo, M.B., R.G. Pearson, W. Thuiller and M. Erhard. 2005. Validation of species–climate impact models under climate change. *Global Change Biology*. 11(9): 1504–1513.
- Busby, J.R. 1991. BIOCLIM - A bioclimate analysis and prediction system. *Plant Protection Quarterly* 6:8–9.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2012. Bases de datos para modelar la distribución geográfica de las especies. Control de calidad. Manual de procedimiento. México. 59 pp.
- Congalton, R.G. and K. Green. 2009. Assessing the accuracy of remotely sensed data. Principles and practices. CRC Press. 2a ed. EUA. 172 pp
- Escalante M.A., F.J. García-De-León, C.B. Dillman, A. de los Santos C., A. George, I. de los A. Barriga-Sosa, A. Ruiz-Luna, R.L. Mayden, S. Manel. 2014. Genetic introgression of cultured rainbow trout in the Mexican native trout complex. *Cons. Genet.* ISSN 1566-0621. DOI 10.1007/s10592-014-0599-7
- Hendrickson, D.A., H. Espinosa P., J.T. Findley, W. Forbes, J.R. Tomelleri, R.L. Mayden, J.L. Nielsen, B. Jensen, G. Ruiz C., A. Varela R., A. van der Heiden, F. Camarena and F.J. García de León. 2002. Mexican native trouts: a review of their history and current systematic and conservation status. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 12: 273–316
- Hendrickson, D.A., D.A. Neely, R. Mayden, K. Anderson, J. E. Brooks, F. Camarena-Rosales, R. Cutter, L. Cutter, A. B. De los Santos, G. W. Ernsting, H. Espinosa-Pérez, L. T. Findley, F. J. García de León, A. George, J. Hatch, B. R. Kuhajda, K. Mayden, K. Mcnysset, J. L. Nielsen, F. W. Pfeifer, D. L. Propst, G. Ruiz Campos, E. St. Clair, J. R. Tomelleri and A. Varela Romero. 2006. “Conservation of Mexican native trout and the discovery, status. Protection and recovery of the Conchos trout, the first native”. Páginas 162-201. In: Lozano-Vilano, M.L. and A. J. Contreras-Balderas (Eds.) *Studies of*

- North American desert fishes in honor of E.P. (Phil) Pister, Conservationist. Universidad Autónoma de N.L., Monterrey, México 208 p.
- Hernandez P.A., I. Franke, S.K. Herzog, V. Pacheco, L. Paniagua, H.L. Quintana, A.Soto, J.J. Swenson, C. Tovar, T.H. Valqui, J. Vargas, B.E. Young. (2008). Predicting species distributions in poorly-studied landscapes. *Biodiversity and Conservation* 17:1353–1366
- Hijmans, R.J., L. Guarino and P. Mathur. 2012. DIVA-GIS Version 7.5. Manual. On line: http://www.diva-gis.org/docs/DIVA-GIS_manual_7.pdf
- Hijmans, R.J and J. Elith, 2013. Species distribution with R. On line: <http://cran.r-project.org/web/packages/dismo/vignettes/sdm.pdf>
- James, F.C., R. F. Johnston, N. O. Wamer, G. J. Niemi, and W. J. Boecklen. 1984. The Grinnellian niche of the Wood Thrush. *American Naturalist* 124:17–47.
- Landis J.R. and Koch G.G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*. 33(1):159-74.
- Lang, J.S., B.F. Oppenheim, and R.N. Knight. 1998. Southern steelhead *Oncorhynchus mykiss* habitat suitability survey of the Santa Margarita River, San Mateo and San Onofre creeks on Marine Corps Base Camp Pendleton, California. U. S. Fish and Wildlife Service, Coastal Calif. Fish and Wildlife Office, Arcata, CA, for Environmental Security, Marine Corps Base Camp Pendleton. vii + 118 pp., 4 appendices.
- Mayden, R. 2005. SGER: Biodiversity of Native Mexican Trout (Genus *Oncorhynchus* spp.) and the impending treat of their demise by the exotic rainbow trout *O. mykiss gairdneri* (Teleostei: Salmonidae). DEB 0240184. Final Report. 33 p. En línea: http://bio.slu.edu/mayden/truchas/NSF_trout_final_report.pdf
- Minckley W.L. y R.R. Miller. 2009. Extirpación, extinción y conservación. En: Miller R.R. (ed.). Peces dulceacuícolas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Sociedad Ictiológica Mexicana A. C., El colegio de la Frontera Sur y Consejo de los Peces del Desierto México-Estados Unidos. México, D.F. 292 p.

- Miller R.R. (ed.). 2009. Peces dulceacuícolas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Sociedad Ictiológica Mexicana A. C., El colegio de la Frontera Sur y Consejo de los Peces del Desierto México-Estados Unidos. México, D.F. 292 p.
- Murguía, M., C. Rahbek, T.F. Rangel, J.A.F. Diniz-Filho and M.B. Araújo. 2012. Equilibrium of Global Amphibian Species Distributions with Climate. PLoS ONE 7(4):e34420. doi:10.1371/journal.pone.0034420
- Nielsen, J.L. 1997. Molecular Genetics and Evolutionary Status of Trout of the Sierra Madre. In: Greeswell RE, Dwyer P, Hamre RH (ed.) Wild Trout VI. Putting the Native Back in Wild Trout, Montana State University, Montana. Pp. 103-109
- Nielsen, J.L., M.C. Fountain, J. Campoy-Favela, K. Cobble and B.L. Jensen. 1998. *Oncorhynchus* at the southern extent of their range: a study of mtDNA control-region sequence with special reference to an undescribed subspecies of *O. mykiss* from Mexico. Environ. Biol. Fish. 51: 7-13
- Nielsen, J.L., K.D. Crow and M.C. Fountain. 1999. Microsatellite diversity and conservation of a relic trout: McCloud River redband trout. Mol. Ecol. 8: 129–142
- Nielsen, J.L. and G.K. Sage. 2001. Microsatellite analyses of the trout of northwest Mexico. Genetica 111: 269–278
- Peterson, A. T., J. Soberón, R. G. Pearson, R. Anderson, E. Martínez-Meyer, M. Nakamura and M. Araújo. 2011. Ecological Niches and Geographic Distributions. Princeton University Press, Princeton
- Phillips, S. J., R. P. Anderson, and R. E. Schapire. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. Ecological Modelling 190:231–259.
- Phillips, S. J., and M. Dudík. 2008. Modeling of species distributions with Maxent: New extensions and a comprehensive evaluation. Ecography 31:161–175.
- Richards, J. A. and X. Jia. 2006. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. Springer. Germany. 439 pp.

- Scheldeman, X. y M. van Zonneveld. 2011. Manual de Capacitación en Análisis espacial de diversidad y distribución de plantas. Biodiversity International, Roma, Italia. 186 pp.
- Soberón J. & M. Nakamura. 2009. Niches and distributional areas: concepts, methods, and assumptions. PNAS 106:19644-19650. En línea: <http://www.pnas.org/content/106/suppl.2/19644.full.pdf+html>.
- Soberón, J. and A. T. Peterson. 2005. Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. Biodiversity Informatics 2:1-10.
- Stockwell D. & D. Peters. 1999. The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction, International Journal of Geographical Information Science, 13:2, 143-158
- Stockwell, D.R.B. & Noble, I.R. 1992. Induction of sets of rules from animal distribution data: a robust and informative method of data analysis. Mathematics and Computers in Simulation, 32, 249-254